



Heidi Kirppu

Hiilineutraalien kaukolämmön erillistuotantoteknologioiden hyödyntämismahdollisuudet kaupunkiympäristössä

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 9.11.2015

Valvoja: Professori Risto Lahdelma

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Antti Saikkonen

Tekijä Heidi Kirppu

Työn nimi Hiilineutraalien kaukolämmön erillistuotantoteknologioiden hyödyntämismahdollisuudet kaupunkiympäristössä

Koulutusohjelma Energia- ja LVI-tekniikka

Pääaine Energiatekniikka

Koodi K3007

Työn valvoja Professori Risto Lahdelma

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Antti Saikkonen

Päivämäärä 9.11.2015

Sivumäärä 95 + 7

Kieli suomi

Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi yhteiskunnan on tarpeen vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja siirtyä käyttämään vähäpäästöisempiä energian tuotantomuotoja. Suomessa lämmönkulutus vastaa noin 25 % kaikesta primäärienergian kulutuksesta, joten lämmöntuotannolla on merkittävä rooli pyrittäessä hiilineutraaliin energiantuotantoon.

Tässä diplomityössä tutkittiin potentiaalisten hiilineutraalien lämmöntuotantoteknologioiden soveltuvuutta tarkasteltavassa kaupunkiympäristössä. Tekniikoiden soveltuvuutta vertailtiin käyttäen stokastista monikriteeristä arvostusanalyysiä (SMAA). Tässä analyysissä määritettiin tarkasteltavat vaihtoehdot ja käytettävät kriteerit kaukolämmön tuotantojärjestelmän toimintavarmuutta korostaen. Aineisto analysoitiin Monte Carlo -simulointia käyttäen Excel-taulukkolaskentaohjelmassa ja tarkastettiin SMAA-työkalulla. Analyysi tehtiin sekä asiantuntijoiden antamia painoarvoja käyttäen että ilman. Analyysin tuloksina korkeimman ensimmäisen sijan hyväksyttävyyden saivat sähkökattilat ja lyhytaikaislämpövarastot molemmissa tapauksissa, vaikka ensimmäinen sija vaihtelikin näiden välillä. Sähkökattiloita ja lämpövarastoja voidaankin pitää kiinnostavina tulevaisuuden teknologioina etenkin huippukulutuskausina kulutuksen ja tuotannon yhteensovittamisessa.

Teknologioiden taloudellisia edellytyksiä vertailtiin laskemalla tasoitettuja tuotantokustannuksia (LCOH) huipunkäyttöajan funktiona sekä tarkastelemalla tuloksia herkkyysoanalyysillä. Tarkasteluissa todettiin, että tuotantovaihtoehtojen kustannusrakenteet poikkeavat toisistaan huomattavasti muun muassa alkuinvestointien ja polttoainekulujen suhteen. Suuren alkuinvestoinnin edellyttävät teknologiat ovat tasoitetuilta tuotantokustannuksiltaan edullisia suurilla huipunkäyttöajoilla, sillä tällöin korostuu polttoainekulujen merkitys. Pelkkiin polttoainevaihtoihin perustuvat tuotantovaihtoehdot ovat pääosin tuotantokustannuksiltaan tasaisempia myös pienellä huipunkäyttöajalla.

Tutkimuksesta voidaan todeta johtopäätöksinä, että tulevaisuuden hiilineutraalissa kaukolämmön erillistuotannossa tarvitaan todennäköisimmin useita teknologioita, jotka pystyvät vastaamaan lämmöntarpeen vaihteluihin. Jatkotutkimusta tarvitaan vielä etenkin pitkäaikaisten lämmönvarastoinnin ja muiden kysynnän ja tuotannon tasaamiseen tarkoitettujen menetelmien suhteen. Lisää tutkimusta tarvitaan myös laajemmalla näkökulmalla huomioiden joutavuus- ja optimointimahdollisuudet eri energiajärjestelmien välillä.

Avainsanat hiilineutraali, kaukolämpö, erillislämmöntuotanto, monikriteerianalyysi, SMAA



Author Heidi Kirppu

Title of thesis Feasibility of carbon neutral heat-only production technologies for district heating in urban area

Degree programme Energy and HVAC Technology

Major Energy Technology

Code K3007

Thesis supervisor Professor Risto Lahdelma

Thesis advisor Antti Saikkonen M.Sc. (Tech.)

Date 9.11.2015

Number of pages 95 + 7

Language Finnish

Abstract

Climate change mitigation requires reducing the dependence on fossil fuels and a transition to low carbon energy production technologies. In Finland the heat consumption accounts for approximately 25% of total energy consumption. Thus heat production has a significant role in achieving a carbon-neutral energy system.

This thesis examines the feasibility of potential carbon-neutral heat production technologies in the case urban area. The feasibility of different technologies were compared using stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA). The alternatives and criteria were determined in this analysis emphasizing the reliability of the district heating production system. The data was analyzed using Monte Carlo simulation in the Excel spreadsheet program and SMAA analysis tool. The analysis was conducted with and without the expert preference information. The highest first rank acceptability was received by electric boilers and short-term thermal energy storages in both cases, even though the first rank varied between these two alternatives. Consequently electric boilers and hot water thermal energy storages may be considered attractive future solutions particularly in balancing peak load energy consumption and production.

The economic feasibility was analyzed by calculating the levelized cost of heat (LCOH) as a function of yearly peak load hours. Sensitivity analyses of the results were also carried out. It was concluded that the alternative heat production technologies had considerably different cost structures especially concerning the share of initial investment and fuel costs. Technologies requiring a large initial capital investment were economical with high peak operation time, because the impact of reduced fuel costs was then emphasized. Production alternatives based on changing to biofuels had reasonable costs with small peak operating times.

As a conclusion in this study it could be stated that carbon-neutral district heating production system will need various different technologies to be able to meet the fluctuations in the heat demand. Thus considerably more research on the subject is necessary to design the optimal future carbon neutral district heating production system. Especially the research should focus on long-term thermal heat storages and other solutions in balancing the demand and supply. The future research should also have a broader view over the urban infrastructure and take into consideration the flexibility between all energy networks.

Keywords carbon-neutral, district heating, heat-only production, multicriteria decision analysis, SMAA

Alkusanat

Tämä diplomityö toteutettiin Helen Oy:n toimeksiannosta. Aiheen valintaan päädyttiin tulevaisuuden energiantuotannon haasteiden asettamista tutkimus- ja kehitystarpeista, ja työn ajankohtainen sekä haastava aihe olikin minun kannaltani erittäin mielenkiintoinen. Kaupunkien lämmöntuotannon tulevaisuuden haasteisiin vastaaminen vaatii monen ihmisen panosta, ja oli erittäin hienoa päästä antamaan oma osansa tutkimukseen.

Työn valvojana toimi professori Risto Lahdelma Aalto-yliopiston Energiatekniikan laitokselta. Haluan erityisesti kiittää professori Risto Lahdelmaa hänen osoittamastaan mielenkiinnosta työtäni kohtaan ja hyvistä neuvoista etenkin SMAA-analyysissä. Erityiskiitokset kuuluvat myös professori Sanna Syrille Aalto-yliopiston Energiatekniikan laitokselta neuvoista ja ohjauksesta työn alkuun saattamiseksi sekä kaikesta saamastani tuesta ja inspiraatiosta opintojen aikana.

Haluan kiittää tämän työn mahdollistaneita henkilöitä Helen Oy:ltä. Ensimmäkin haluan kiittää ohjaajaani DI Antti Saikkosta arvokkaasta ohjauksesta. Haluan myös kiittää DI Antti Saikkosta, esimiestäni DI Jaakko Tiittasta, yksikönpäällikkö DI Juhani Aaltosta, sekä johtaja DI Marko Riipistä saamastani mahdollisuudesta tehdä diplomityö näin mielenkiintoisesta aiheesta sekä kaikista antoisista keskusteluista diplomityön prosessin etenemisen varrelta. Haastattelun muodossa diplomityöni edistämisestä haluan kiittää Timo Arposta, Tea Erätuulta, Jussi Kukkosta ja Mirka Mäkelää. Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita keskusteluihin ja tutkimukseen osallistuneita henkilöitä Helen Oy:llä sekä työtovereitani hyvästä työilmapiiristä.

Viimeiseksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni saamastani tuesta ja kannustuksesta koko opiskeluiden ja tämän opettavaisen diplomityöprosessin aikana. Erityiskiitos Akse-lille!

Espoo 9.11.2015

Heidi Kirppu

Sisällysluettelo

| | |
|---|----|
| Tiivistelmä | |
| Abstract | |
| Alkusanat | |
| Sisällysluettelo | 1 |
| 1 Johdanto | 5 |
| 1.1 Tutkimuksen tausta..... | 5 |
| 1.2 Työn tavoitteet..... | 6 |
| 1.3 Työn rajaus ja rakenne | 7 |
| 2 Kaukolämmön erillistuotanto..... | 8 |
| 2.1 Kaukolämmön toimintaperiaatteet ja tuotantorakenne..... | 8 |
| 2.2 Erillistuotannon ominaispiirteet | 11 |
| 2.3 Kaukolämmön kehitysnäkymät | 13 |
| 3 Hiilineutraalit termisen energian tuotantoteknologiat..... | 16 |
| 3.1 Biomassan polttotekniikat | 16 |
| 3.1.1 Kiinteät biopolttoaineet ja kattilat..... | 17 |
| 3.1.2 Nestemäiset biopolttoaineet | 21 |
| 3.1.3 Biokaasut..... | 23 |
| 3.2 Aurinkolämpö..... | 25 |
| 3.3 Geoterminen energia | 30 |
| 3.4 Ympäristön lämmön ja ylijäämälämpöjen hyödyntäminen..... | 33 |
| 3.4.1 Maalämpöpumput | 34 |
| 3.4.2 Merivesilämpöpumput | 34 |
| 3.4.3 Matalan lämpötilan ylijäämälämpöjen hyödyntäminen | 36 |
| 3.5 Termisen energian varastoinnin rooli..... | 36 |
| 3.5.1 Lyhytaikaisvarastot | 38 |
| 3.5.2 Kausivarastot..... | 39 |
| 3.6 Muut termisen energian tuotantomuodot | 41 |
| 3.6.1 Sähkökattilat käyttäen hiilineutraalia sähköä..... | 41 |
| 3.6.2 CCS-teknologian hyödyntäminen | 42 |
| 3.7 Referenssikohteita maailmalta..... | 43 |
| 3.7.1 Kööpenhamina, Tanska..... | 43 |
| 3.7.2 Skotlanti, Iso-Britannia | 45 |
| 3.7.3 Akershus, Norja..... | 47 |
| 4 Soveltuvuus kaupunkiympäristön kaukolämmön erillistuotantoon..... | 48 |
| 4.1 Lähtötiedot..... | 48 |
| 4.1.1 Tarkastelu ympäristön kuvaus..... | 48 |
| 4.2 Käytetyt menetelmät..... | 50 |
| 4.2.1 Monikriteerianalyysi | 50 |
| 4.2.2 Taloudelliset laskentamenetelmät | 52 |
| 5 Soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät ja rajoitteet | 54 |
| 5.1 Tekniseen soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät..... | 54 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1.1 | Saatavuus | 54 |
| 5.1.2 | Varastoitavuus..... | 54 |
| 5.1.3 | Laitoksen luotettavuus | 55 |
| 5.1.4 | Käytön joustavuus ja säädettävyys..... | 55 |
| 5.1.5 | Teknisen potentiaalin rajoitteet | 56 |
| 5.2 | Ympäristövaikutukset..... | 57 |
| 5.2.1 | Tilantarve ja logistiikka..... | 57 |
| 5.2.2 | Päästöjen väheneminen | 58 |
| 5.3 | Taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat tekijät..... | 58 |
| 5.3.1 | Investointikustannukset..... | 59 |
| 5.3.2 | Käyttö-, huolto- ja polttoainekustannukset | 59 |
| 5.3.3 | Kaukolämmön kustannuskehitys | 60 |
| 5.3.4 | Poliittiset ja lainsäädännölliset tekijät..... | 61 |
| 6 | Teknologioiden soveltuvuuden vertailu | 62 |
| 6.1 | Monikriteerianalyttinen vertailu..... | 62 |
| 6.1.1 | Tarkasteltavat vaihtoehdot | 62 |
| 6.1.2 | Kriteerien määrittäminen ja arviointiperusteet..... | 64 |
| 6.1.3 | Kriteerianalyysin tulokset | 66 |
| 6.2 | Taloudellinen vertailu..... | 71 |
| 6.2.1 | Tasoitettu lämmöntuotantokustannus | 71 |
| 6.3 | Herkkyysanalyysit ja luotettavuus..... | 74 |
| 6.3.1 | Monikriteerianalyysin validiteetti | 74 |
| 6.3.2 | Taloudellisten tarkastelujen herkkyysanalyysi | 75 |
| 7 | Tulosten tarkastelu ja pohdinta | 80 |
| 7.1 | Tekniikoiden potentiaalit ja rajoitteet..... | 80 |
| 7.2 | Yhteenveto tekniikan soveltuvuudesta eri tehoryhmiin | 81 |
| 7.3 | Johtopäätökset | 82 |
| 7.4 | Jatkotutkimusehdotukset | 84 |
| 8 | Yhteenveto | 86 |
| | Lähdeluettelo..... | 88 |
| | Liiteluettelo | 96 |
| | Liitteet | |

Merkinnät

| | | |
|---------------|---------------------------------------|--|
| G | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | kokonaissäteilyn määrä |
| L | $[\text{kJ}/\text{kg}]$ | aineen latenttilämpö faasimuutoksessa |
| LCOH | $[\text{€}/\text{MWh}]$ | tasoitettu lämmöntuotantokustannus (<i>Levelized Cost of Heat</i>) |
| Q | $[\text{kJ}]$ | lämpöenergiämäärä |
| T_∞ | $[\text{°C}]$ | ulkoilman lämpötila |
| T_c | $[\text{°C}]$ | aurinkokeräimen lämpötila |
| c_p | $[\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}]$ | ominaislämpökapasiteetti |
| k | $[\text{W}/\text{m}^2\text{°C}]$ | lämpöhäviökerroin |
| m | $[\text{kg}]$ | aineen massa |
| ΔT | $[\text{°C}]$ | lämpötilaero |
| η | $[\%]$ | hyötysuhde |
| η_0 | $[\%]$ | optinen hyötysuhde aurinkokeräimelle |

Lyhenteet

| | |
|-----------------|---|
| ATES | <i>Aquifer thermal energy storage</i> , pohjavesilämpövarasto |
| BFB | <i>Bubbling Fluidized Bed</i> , kupliva kerrosleijupeti |
| BTES | <i>Borehole thermal energy storage</i> , porareikälämpövarasto |
| CCS | <i>Carbon Capture and Storage</i> , hiilidioksidin talteenotto ja varastointi |
| CFB | <i>Circulating Fluidized Bed</i> , kiertoileijupeti |
| CHP | <i>Combined Heat and Power</i> , sähkön ja lämmön yhteistuotanto |
| CO ₂ | Hiilidioksidi |
| COP | <i>Coefficient Of Performance</i> , lämpöpumpun hyötysuhde |
| CSHPDS | <i>Central solar heating plant with diurnal storage</i> , keskitetty aurinkolämpölaitos päivittäisvarastolla |
| CSHPSS | <i>Central solar heating plants with seasonal storage</i> , keskitetty aurinkolämpölaitos kausivarastolla |
| CSP | <i>Concentrated Solar Power</i> , keskittävä aurinkovoima |
| EGS | <i>Enhanced Geothermal System</i> , syvä geotermien energia |
| E2T | <i>Electricity-To-Thermal</i> , sähkön varastointi lämpönä |
| FAME | <i>Fatty Acid Methyl Ester</i> , eläin- tai kasvirasvoista transesteröintiprosessilla valmistettu biodiesel |
| HHV | <i>Higher Heating Value</i> , ylempi lämpöarvo |
| HOB | <i>Heat Only Boiler</i> , lämpölaitos (polttolaitos/kattilalaitos) |
| HVO | <i>Hydrotreated Vegetable Oil</i> , eläin- tai kasvirasvoista vetykäsittelyllä valmistettu toisen sukupolven biodiesel. |
| KPA | kiinteä polttoaine |
| KPÖ | kevyt polttoöljy |
| LCOH | <i>Levelized Cost of Heat</i> , lämmön tasoitettu tuotantokustannus |
| LHV | <i>Lower Heating Value</i> , alempi eli tehollinen lämpöarvo |
| LTDH | <i>Low temperature district heating</i> , matalan lämpötilan kaukolämpö |
| MCDA | <i>Multi-Criteria Decision Analysis</i> , monikriteerianalyysi |
| PCM | <i>Phase Changing Material</i> , faasinmuutosmateriaalit |
| PTES | <i>Pit thermal energy storages</i> , kaivantolämpövarastot |
| RPÖ | raskas polttoöljy |
| SMAA | <i>Stochastic multicriteria acceptability analysis</i> , stokastinen monikriteerinen arvostusanalyysi |
| SNG | <i>Synthetic natural gas</i> , synteettinen maakaasu |
| SF | <i>Solar fraction</i> , aurinkosuhte |
| STG | <i>Smart Thermal Grid</i> , älykäs lämpöverkko |
| TES | <i>Thermal Energy Storage</i> , termisen energian varastointi |
| TTES | <i>Tank thermal energy storages</i> , vesisäiliölämpövarastot |

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Energian tuotanto ja käyttö tuottavat huomattavan osan ilmastonmuutosta aiheuttavista kasvihuonekaasupäästöistä. Suurin osuus päästöistä on hiilidioksidia, jota vapautuu ilmaan pääasiassa fossiilisia polttoaineita poltettaessa. Maailman kokonaisenergiankulutuksesta 81,7 % saatiin fossiilisista energialähteistä vuonna 2012. (IEA 2014) Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi nyky-yhteiskunnan on tarpeen vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja siirtyä käyttämään energian tuotantomuotoja, jotka eivät kasvata ilmakehän CO₂-pitoisuutta. (IPCC 2014)

Euroopan Unionin on sitoutunut vähentämään päästöjä 80–95 % alle vuoden 1990 tason ja siirtymään vähähiiliseen talouteen vuoteen 2050 mennessä. Suurin päästövähennyspotentiaali odotetaan olevan energiantuotannossa, jossa arvioidaan voitavan eliminoida päästöt lähes kokonaan siirtymällä hiilineutraaliin tuotantoon. Haasteena on samanaikaisesti myös pyrkiä turvaamaan energiansaannin varmuus ja kilpailukyky. (Euroopan komissio 2011)

Hiilineutraalilla (*engl. carbon neutral*) teknologialla tarkoitetaan yleensä hiilidioksidipäästöjä tai hyvin vähäpäästöistä teknologiaa. Termi on lyhenne hiilidioksidineutraalista. Muut energianlähteet kuin fossiiliset polttoaineet tyypillisesti luokitellaan hiilineutraaleiksi. Biomassapohjaiset polttoaineet luokitellaan myös hiilineutraaleiksi, kun niiden käyttöä tarkastellaan pidemmällä aikavälillä. Tämä perustuu siihen, että kun biomassan käyttö on kestävää eli uutta biomassaa syntyy yhtä paljon kuin sitä käytetään, biomassaan sitoutuu kasvun aikana sama määrä hiilidioksidia kuin ilmakehään vapautuu palamisessa. (Basu 2013)

Rakennusten lämmityksen osuus kaikesta energiankulutuksesta on yksi suurimmista energian loppukäytön kohteista. Rakennusten lämmityksen osuus on Suomessa 25 % kaikesta primäärienergiankulutuksesta, kun vastaavasti liikenteen osuus on 16 %. (Tilastokeskus 2015) Tämän takia lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentämisellä on merkittävä osuus energiantuotannon kokonaispäästöjen vähentämisessä. Tästä syystä kannattaa keskittyä tutkimaan myös mahdollisuuksia lisätä uusiutuvien ja hiilineutraalien energianlähteiden käyttöä lämmöntuotannossa.

Kaukolämpöä on Suomessa perinteisesti tuotettu pääosin lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksissa. Yhteistuotannon hyötysuhteet ovat korkeita, noin 85–95 % välillä, mikä on parantanut polttoaineiden käytön tehokkuutta ja vähentänyt päästöjä verrattuna vastaavaan erillistuotantoon, sillä sähkön lauhdetuotannon hyötysuhteet jäävät yleensä alle puoleen tästä. Lämmöntuotannossa on kuitenkin käytetty pitkään pääosin fossiilisia polttoaineita, kuten maakaasua, kivihiiltä, turvetta ja öljyä. Nykyään kuitenkin myös biopolttoaineiden käyttö lämmöntuotannossa on kasvussa. Suomessa biopolttoaineiden osuus lämmöntuotannossa on noussut noin kolmannekseen käytetyistä polttoaineista, esimer-

kiksi vuoden 2014 aikana 34 % käytetyistä polttoaineista oli uusiutuvia. (Energiateollisuus ry 2015a) Toisaalta biomassavarannot ja kasvatuspinta-ala ovat maailmassa rajalliset, ja niiden käytön painetta voidaan vähentää tutkimalla myös muiden uusiutuvien energialähteiden käyttöä lämmöntuotannossa, sekä lämmönkierrätyksen ja energiatehokkuuden parantamismahdollisuuksia. (Lund et al. 2014)

Lämmön ja jäähdytyksen tuotantoteknologiat ovat aiemmin jääneet vähäisemmälle huomiolle kansainvälisessä tutkimus- ja kehitystyössä sekä energiapoliittisissa päätöksissä, mikä voi johtua lämmityksen pienemmästä merkityksestä globaalissa mittakaavassa kuin pohjoisissa maissa. Viimeaikoina kuitenkin Euroopassa lämmityksen ja jäähdytyksen merkitykseen on alettu kiinnittämään huomiota. Esimerkiksi julkaisussa ”*Heat Roadmap Europe*” (Connolly et al. 2014) todetaan, että lämmitys ja jäähdytys muodostavat merkittävän osan energiankäytöstä ja ne ovat olennainen osa kokonaisuutta pyrittäessä siirtämään vähähiiliseen yhteiskuntaan.

Kaukolämmön nykyinen tutkimus onkin alkanut vähitellen keskittyä matalan lämmöntarpeen alueiden ja matala-energiarakennusten lämmönhankintaan sekä kasvavan lämmön osuuden tuottamiseen uusiutuvilla energianlähteillä. (Kuosa et al. 2013) Fossiilisia polttoaineita polttavissa voimalaitoksissa on perinteisesti voitu tuottaa sähkön lisäksi energiatehokkaasti kaukolämpöä. Uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyessä polttotekniikoilla tuotettavan sähkön osuus voi kuitenkin pienentyä. Tämän seurauksena lämmön yhteistuotantomahdollisuudet voivat vähentyä ja saatetaan tarvita enemmän lämmön erillistuotantoa. Kaukolämpöjärjestelmissä etenkin suuren koon mukanaan tuoma jousto lisää mahdollisuuksia myös uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämiseen, joita ei voida käytännöllisesti tai taloudellisesti hyödyntää pienissä erillisissä lämmitysjärjestelmissä. (Ghafghazi et al. 2010b)

Nykykehityksen valossa onkin tarpeellista tutkia hiilineutraaleiden lämmöntuotantoteknologioiden hyödyntämistä kaukolämmön erillistuotannossa. Teknis-taloudellisena haasteena voidaan pitää etenkin hiilidioksidineutraalin tuotannon sovittamista järjestelmään siten, että energiantuotannon luotettavuus ja kohtuulliset tuotantokustannukset säilyvät.

1.2 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on tutkia ja vertailla uusia potentiaalisia teknologioita, joiden avulla hiilineutraali lämmön erillistuotanto myös huippukulutuskausina olisi mahdollista toteuttaa kustannustehokkaasti ja luotettavasti. Lisäksi tarkoituksena on tuottaa potentiaalisista hiilineutraaleista lämmöntuotantoteknologioista laskennallista ja kirjallisuustutkimukseen pohjautuvaa tietoa, jota voidaan käyttää hyödyksi tulevaisuuden tuotannon suunnittelussa sekä jatkotutkimuskohteiden tunnistamisessa.

Työssä myös määritellään etenkin huippu- ja varatuotannossa lämmöntuotantoteknologioiden soveltuvuuden mittaamiseksi kriteerit, joita voidaan käyttää myös jatkossa uudempien teknologioiden potentiaalın arvioimiseksi. Työssä käytettävää menetelmää voidaan

laajentaa ja soveltaa käytettäväksi myös jatkotutkimuksissa. Tutkimusongelma voidaan esittää seuraavien kysymysten muodossa:

- Millaiset hiilineutraalit lämmöntuotantoteknologiat soveltuvat kaukolämmön erillistuotantoon ja tuotantorakenteen eri tehoryhmiin ottaen huomioon erityisesti huippu- ja varatuotannon?
- Mitkä tekijät rajoittavat hiilineutraalien teknologioiden hyödyntämistä kaukolämmön erillistuotannossa tutkittavassa kaupunkiympäristössä ja mihin nämä rajoitteet perustuvat?
- Miten kaukolämmön erillistuotannossa voidaan siirtyä teknisesti ja taloudellisesti kannattaviin hiilineutraaleihin tuotantomenetelmiin?

1.3 Työn rajaus ja rakenne

Työ on aihealueeltaan rajattu pelkän lämmön tuotantoon eli kaukolämmön erillistuotantoon. Työssä ei perehdytä kaukolämmön yhteistuotannon menetelmiin. Tarkastelun lähtökohtana on kaupunkiympäristö, jossa suurin osa kaukolämmöstä tuotetaan yhteistuotannolla ja erillistuotantoa käytetään pääosin lisä- ja varakapasiteettina kylmempinä kausina ja varalla. Teknologioiden kehitystä tarkastellaan globaalisti, mutta teknologioiden soveltuvuutta tarkastellaan tarkemmin erityisesti tutkittavassa kaupunkiympäristössä Etelä-Suomen ilmasto-olosuhteissa.

Työ on jaettu johdannon jälkeen seitsemään lukuun. Ensin keskitytään tutkimuksen teoreettiseen tausta-aineistoon kirjallisuustutkimuksen perusteella. Luvussa 2 kuvataan kaukolämmön tuotannon toimintaperiaatteita Suomessa, jotta saadaan käsitys tutkimuksen kontekstista. Luvussa 3 perehdytään erillistuotannon näkökulmasta potentiaalsiin hiilineutraaleihin lämmön tuotantoteknologioihin ja esitellään käytössä tai suunnitteilla olevia hiilineutraaleita lämmöntuotantoratkaisuja maailmalla.

Tämän jälkeen luvussa 4 esitellään tarkasteltava kaupunkiympäristö ja tutkimuksen lähtökohdat sekä käytettävät menetelmät. Luvussa 5 keskitytään lämmöntuotantoteknologioiden soveltuvuuteen vaikuttavien tekijöiden ja rajoitteiden tunnistamiseen ja tarkasteluun tutkittavassa kaupunkiympäristössä.

Seuraavaksi luvussa 6 analysoidaan eri tuotantoteknologioita sekä monikriteerianalyytisellä menetelmällä että tasoitettuja tuotantokustannuksia vertailemalla, jonka jälkeen tehdään herkkyystarkasteluja. Luvussa 7 keskitytään tulosten tarkasteluun ja pohdintaan. Tämän jälkeen vedetään johtopäätökset tutkimuksen tuloksista ja esitetään jatkotutkimusehdotuksia. Lopuksi luvussa 8 on koottu vielä yhteenveto tutkimuksesta.

Tutkimustyön lukijalla oletetaan olevan perustietämys yleisesti energiatekniikan alasta, tuotantotaloudesta ja kaukolämpötekniikasta. Työssä määritellään käytettävät käsitteet, joilla ei ole vakiintunutta yleisesti käytettyä määritelmää.

2 Kaukolämmön erillistuotanto

Tässä luvussa esitellään lyhyesti kaukolämmön periaatteet ja erillistuotannon ominaispiirteet. Näin saadaan yleiskuva tämän tutkimuksen kontekstista ja olennaisesta taustatiedosta, jota tarvitaan tutkittaessa miten hiilineutraalit lämmöntuotantoteknologiat soveltuisivat tähän tuotantoympäristöön. Ensin kuvataan kaukolämmön tuotannon nykytilaa, toimintaperiaatteita, sekä erillistuotannon ominaispiirteitä. Lopuksi käsitellään ajankohittaisen tutkimustiedon perusteella kaukolämmön tuotannon mahdollisia kehitysnäkymiä tulevaisuudessa.

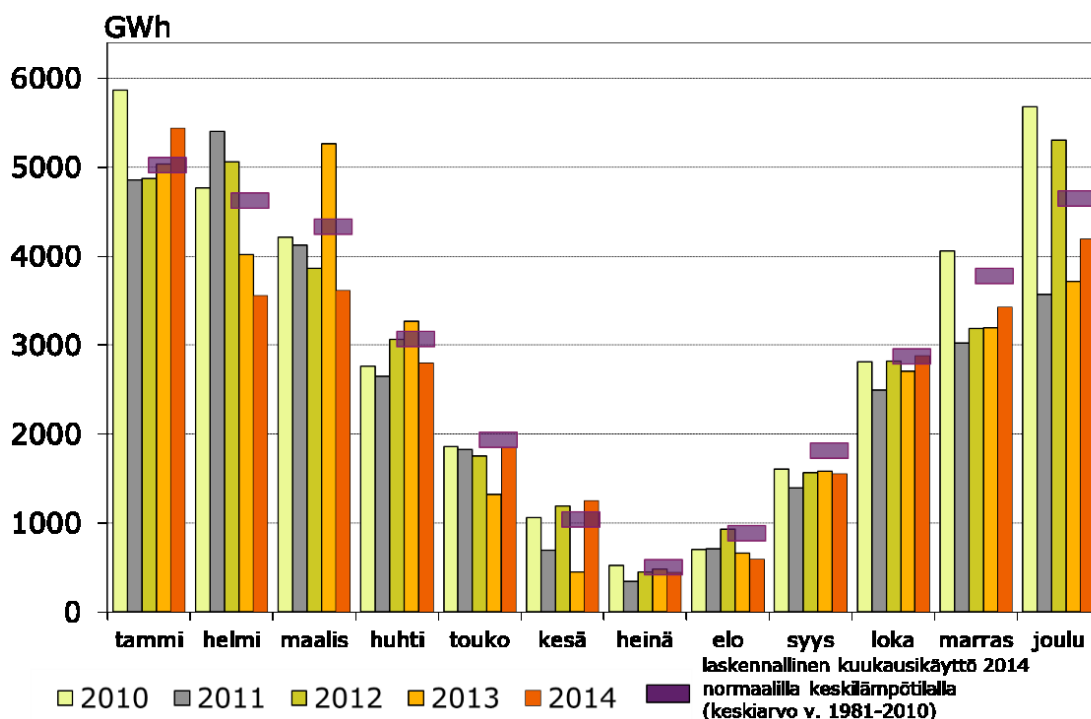
2.1 Kaukolämmön toimintaperiaatteet ja tuotantorakenne

Kaukolämmön kehittäminen alkoi Suomessa 1950-luvulla kun haluttiin pyrkiä eroon runsaasti hiukkaspäästöjä aiheuttavista kiinteistökohtaisista lämmitysjärjestelmistä, jotka huononsivat kaupunkien ilmanlaatua. Kaukolämmitys alkoi pienistä paikallisista alueellisista verkoista, jotka yhdistettiin vähitellen yhtenäisiksi kaupunkikohtaisiksi verkostoksi, mikä paransi järjestelmän kokonaisluotettavuutta ja energiatehokkuutta. Esimerkiksi Helsingissä alueellisen kaukolämmön kehityksen seurauksena pienhiukkas- ja lämmöntuotannon muut päästöt ovat vähentyneet merkittävästi, kun suurin osa kiinteistökohtaisista lämmitysjärjestelmistä korvattiin kaukolämmityksellä, johon sovelletaan tiukempia päästörajoja. Lisäksi kaukolämmön suuremman mittakaavan ansiosta voidaan soveltaa kustannustehokkaasti myös ympäristöystävällisempää tekniikkaa ja päästöjen suodattusta savukaasuja puhdistamalla. Viime vuosikymmeninä kaukolämpöjärjestelmään on alettu yhdistää myös kaukojäähdytyksen tuotantoa, millä on saatu lisättyä yhteistuotannon energiatehokkuushyötyjä. (Suomen ympäristökeskus 2001)

Kaukolämpöä käytetään pääasiassa kahteen tarkoitukseen, lämpimän käyttöveden tuottamiseen ja rakennusten lämmittämiseen. Lämpö tuotetaan tuotantolaitoksilla ja jaellaan kaksiputkijärjestelmää pitkin kuluttajille, joiden lämmön tarve määrittelee tuotannon tarpeen määrän. Verkon lämpötilat on tavallisesti mitoitettu maksimilämpötilan 120 astetta mukaan, joka tulee verkossa olla mitoituslämpötilassa esimerkiksi Etelä-Suomessa -26 °C-asteen lämpötilassa. (Koskelainen et al. 2006) Lämpimän käyttöveden tarve pysyy suhteellisen vakiona eri vuodenaikoina, mutta vaihtelee suuresti päivän sisällä. Lisäksi eri kuluttajien tarpeet osuvat eri aikaan. Maksimikuorma ei siis vastaa yksittäisten kuormien summaa. Samanaikaisuuskerroin kuvaa sitä, kuinka suuri osa yksittäisistä kuluttajakohtaisista kuormista on samaan aikaan käytössä. (Koskelainen et al. 2006)

$$\text{Samanaikaisuuskerroin} = \frac{\text{Järjestelmän maksimikuorma}}{\text{Yksittäisten maksimikuormien summa}} \quad (1)$$

Rakennusten lämmitysenergian tarve puolestaan riippuu voimakkaasti ulkolämpötilasta. Lämmitysenergian tarve on Suomessa suurimmillaan talviaikaan. Lämmityskaudeksi lasketaan syys-toukokuun välinen ajanjakso. Tyypillinen kaukolämmön vuosikulutuskäyrä on esitetty kuvassa 1. Lyhemmillä sykleillä kulutus vaihtelee myös tyypillisten viikko- ja päivärytmien mukaan. (Koskelainen et al. 2006)



Kuva 1. Kaukolämmön kulutus on voimakkaasti kausiluontoista ja painottuu talvikauteen. (Energiateollisuus ry 2015a)

Kaukolämmön tuotantorakenne on yleensä muodostettu vastaamaan tähän vuosittaisen kaukolämmön kulutuskäyrän vaihteluihin. Tuotantorakenne voidaan luokitella perustuotantolaitoksiin, välituotantolaitoksiin, ja huippu- ja varatuotantolaitoksiin. Laitokset, joita on edullista käyttää jatkuvasti, ovat peruskuormalaitoksia. Peruskuormalaitosten on tärkeää olla erittäin luotettavia niiden käytön luonteen vuoksi. Huippu- ja varakuormalaitoksina käytetään laitoksia, jotka tuottavat tehon nopeasti ja joilla on matalat ylläpito- sekä investointikustannukset. Toisaalta niiden käyttökustannukset voivat olla korkeammat, sillä niiden käyttötunnit jäävät vähäisiksi. Välituotantolaitoksia on vaikeampi luokitella, sillä niiden ominaisuudet ovat edellä mainittujen teholuokkien väliltä. Laitosten kustannusrakenne sekä muut ominaisuudet määräävät ajojärjestyksen edellä kuvatun mukaisesti siten, että halvinta mahdollista tuotantomenetelmää käytetään ensimmäisenä. Kaukolämpöverkon tuotantorakenteesta ja polttoainekustannusten vaihteluista riippuen erilaiset tuotantomuodot voivat toimia eri verkoissa erilaisia kuormia vastaavina laitoksina.

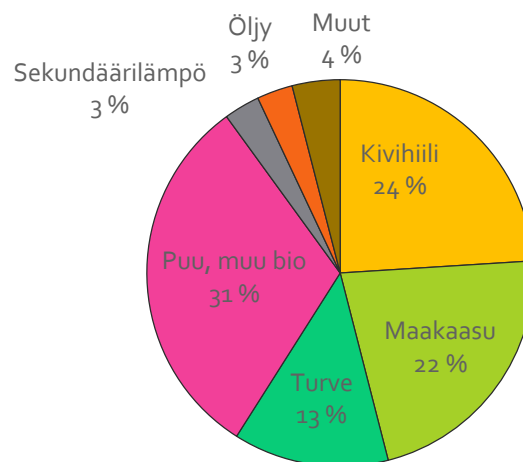
Suuremmissa kaukolämpöverkoissa peruskuorma on tyypillisesti katettu yhteistuotannolla ja erillistuotantokapasiteettia on otettu lisänä käyttöön kylmempinä kausina. Kesällä peruskuorman tarpeeseen kuuluu lähinnä lämpimän käyttöveden lämmitys, kun rakennusten lämmitystä ei juuri tarvita. Kysynnän suuresta vuodenaikaisvaihtelusta johtuen tuotantorakenteessa tarvitaan paljon kapasiteettia, joka ei ole ympärivuotisessa käytössä. Keskitehon tuotantolaitoksia otetaan käyttöön lämmityskaudella syksystä kevääseen ja huippu- ja varatuotantolaitoksia otetaan käyttöön erityisesti pakkaskausiin. Varatuotantolaitokset ovat varalla mitoituksen yli meneviä pakkaskausia varten tai poikkeustilanteita varten jonkin laitoksen poistuessa yllättäen käytöstä. Varalaitosten vuosittaiset käyttötunnit ovat tyypillisesti vähäisiä, ja siksi niiden käyttökustannukset voivatkin olla korkeita ja

investointikustannusten tulisi olla alhaisia. Varalaitoksia tarvitaan usein yllättäen, joten niiden tulee olla nopeasti ja helposti käynnistettävissä. Hyvin lyhyellä käyttöajalla myös tuotettu energiamäärä, päästöt, käytetty polttoaine ja käyttökustannukset jäävät kaikki vähäisiksi. Eri tehoryhmiin sopivilta laitoksilta vaaditut ominaisuudet sekä tyypilliset laitteet on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Lämmön tuotantolaitoksilta vaaditut ominaisuudet tehoryhmittäin. (Koskelainen et al. 2006)

| Perusteho | Keskiteho |
|--|--|
| -jatkuva käyttö | -lähes jatkuva käyttö |
| -edulliset käyttökustannukset | -taloudellinen myös osateholla |
| -hyvä käytettävyys | -edullinen hinta tehoa kohti |
| -tyypillisesti CHP ja kiinteän polttoaineen kattilat | -tyypillisesti kiinteän polttoaineen ja maakaasukattilat |
| Huipputeho | Varateho |
| -edullinen hinta tehoa kohti | -edullinen hinta tehoa kohti |
| -nopea ja helppo käynnistettävyys | -nopea ja helppo käynnistettävyys |
| -tyypillisesti öljy- ja maakaasukattilat | -tyypillisesti öljy- ja maakaasukattilat |

Lämpölaitokset voidaan luokitella kapasiteetin mukaan, joko pieniksi polttolaitoksiksi, jotka ovat tehoiltaan 1-50 MW, tai yli 50 MW luokitellaan suuriksi polttolaitoksiksi. (Energiateollisuus ry 2014) Polttoaineina käytetään usein fossiilisia polttoaineita, kuten maakaasua, kivihiiltä, turvetta ja öljyä, sekä yhä enemmän biomassaa. Suomessa kaikessa kaukolämmön tuotannossa käytetty polttoainejakauma on esitetty kuvassa 2.

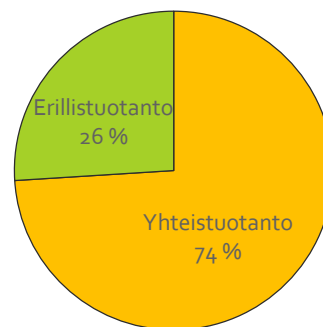


Kuva 2. Kaukolämmön tuotannossa käytetyt polttoaineet Suomessa 2014. Kuvan tietojen lähde: (Energiateollisuus ry 2015a)

2.2 Erillistuotannon ominaispiirteet

Erillislämmöntuotannolla tarkoitetaan tavallisesti pelkän lämmön tuotantoa erillään sähköntuotannosta. Usein kaukolämmön tuotanto liitetään juuri sähkön ja lämmön yhteistuotantoon eli CHP-tuotantoon, sillä suurin osa kaukolämmöstä tuotetaan nykyisin yhteistuotantona. Tässä yhteydessä tarkastellaan kuitenkin lähinnä pelkkää lämpöä tuottavia teknologioita eli termisen energian tuotantoteknologioita. Pelkkiä lämpöä tuottavia kattilalaitoksia, (engl. *HOB*, *heat-only boilers*) on käytetty tavanomaisesti täydentämässä lämmöntuotantotarvetta kylmempinä vuodenaikoina eli vara- ja huipputehon tuotannossa. Pienemmissä kaukolämpöverkoissa HOB-kattiloita saatetaan myös käyttää pääasiallisen tuotantolaitoksen vuosihuollon aikaan tai hyvin pienissä verkoissa ainoana lämmöntuotantolähteinä.

Suomessa erillistuotannon osuus koko kaukolämmöntuotannosta vastaa noin neljäsosaa tuotetusta lämpöenergiasta. Esimerkiksi vuonna 2014 kaukolämmön erillistuotannon osuus oli 26 %, kun taas yhteistuotantoa oli 74 % tuotetusta energiasta. Suhteet on havainnollistettu kuvassa 3. (Energiateollisuus ry 2015a)



Kuva 3. Erillistuotannon osuus tuotetusta kaukolämmöstä Suomessa. Kaavion lähdeateriaali: (Energiateollisuus ry 2015a)

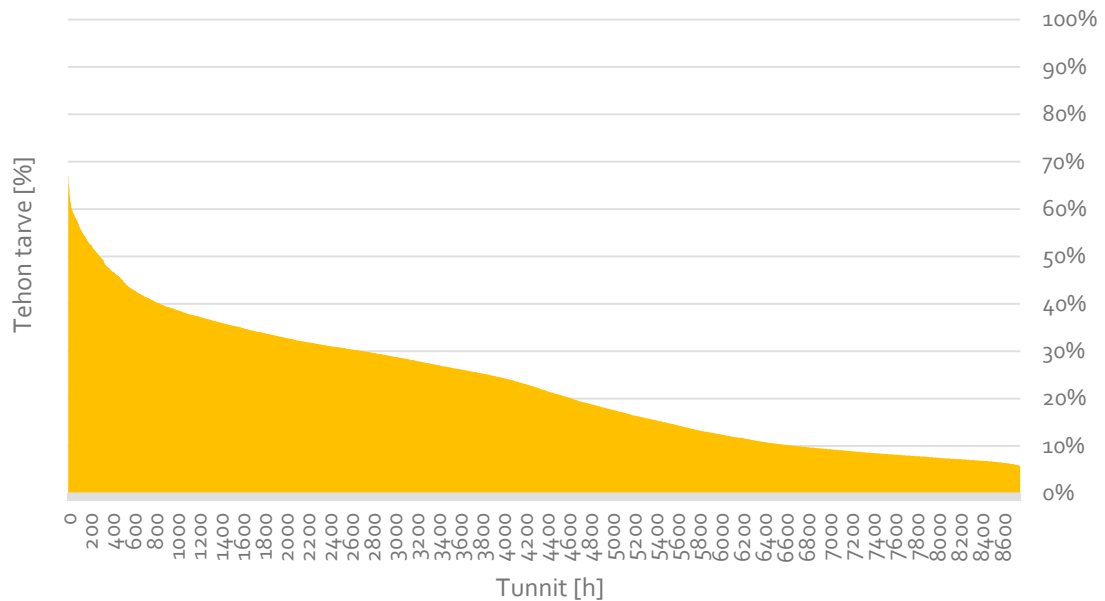
Erillistuotannon osuus tuotetusta energiasta on suhteellisen pieni, vaikka osuus kokonaiskapasiteetista on merkittävä. Tämä johtuu siitä, että erillistuotannon käyttötunnit vuosittain ovat tyypillisesti vähäisiä. Vastaavasti huipunkäyttöaika erillistuotantolaitoksilla on yleensä pieni. Laitosten huipunkäyttöaika voidaan määritellä vuodessa tuotetun energiamäärän ja huipputehon suhteena, eli se kuvaa sitä, kuinka monta tuntia vuodessa laitosta voitaisiin käyttää täydellä teholla vastaavan energiamäärän tuotantoon. (Koskelainen et al. 2006)

$$\text{Huipunkäyttöaika} = \frac{\text{Vuosienergia}}{\text{Huipputeho}} \quad (2)$$

Kapasiteettikerroin kuvaa myös vastaavasti keskimääräistä tehontarvetta suhteutettuna maksimitehon tarpeeseen, mikä saadaan myös jakamalla huipunkäyttöaika vuoden tunteilla. Kapasiteettikerroin voidaan määritellä: (Koskelainen et al. 2006)

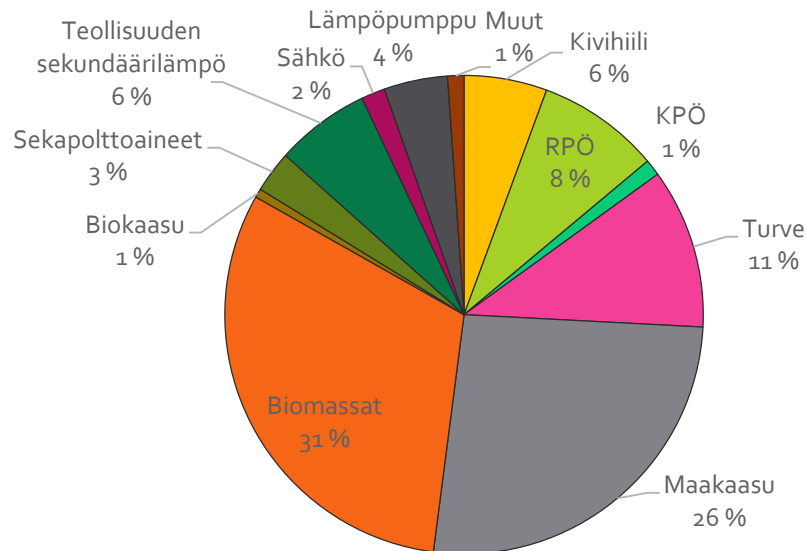
$$\text{Kapasiteettikerroin} = \frac{\text{Keskimääräinen kapasiteettitarve}}{\text{Maksimi kapasiteettitarve}} \quad (3)$$

Kaukolämmön tyypillinen pysyvyyskäyrä on esitetty kuvassa 4. Pysyvyyskäyrän vaakakselilla ovat vuoden tunnit, mutta vaakakseli korreloi myös melko hyvin ulkolämpötilan suhteen etenkin pysyvyyskäyrän oikeassa reunassa. Pysyvyyskäyrän vasemmassa reunassa ulkolämpötila on alhaisin ja lämmöntarve on suurin. Tällöin otetaan käyttöön perustuotantokapasiteetin lisäksi myös huippulämpölaitokset, kun perus- ja keskitehojen mitoitettu kapasiteetti ylittyy. Nämä vuosittaiset huipputehontarpeen tunnit ovat myös suhteessa vähäinen osa vuodesta.



Kuva 4. Kaukolämmön keskimääräinen pysyvyyskäyrä Helsingissä 2012–2014.

Kaukolämmön erillistuotantolaitoksilla on käytetty polttoaineita esimerkiksi vuonna 2013 kuvan 5. mukaisesti. Erillistuotannossa käytetyt polttoaineet poikkeavat jossain määrin yhteistuotannossa käytetyistä polttoaineista. Maakaasua käytetään kaasumaisena polttoaineena myös erillistuotannossa. Turve ja biomassat säilyvät kiinteistä polttoaineista käytettyjen joukossa, mutta yhteistuotannon kivihiili korvautuu erillistuotannossa osin öljyillä, lämpöpumpuilla ja muilla lämmönlähteillä. (Energiategollisuus ry 2014)



Kuva 5. Kaukolämmön erillistuotannossa käytetyt polttoaineet Suomessa 2013. Kaavion lähdemateriaali: (Energiateollisuus ry 2014)

2.3 Kaukolämmön kehitysnäkymät

Suomessa kaukolämpöjärjestelmä on otettu globaalissa mittakaavassa suhteellisen varhain käyttöön. Suomessa kaukolämmön ja etenkin siihen liittyvän yhteistuotannon energiatehokkuuden aikaansaamat päästövähennykset ovat realisoituneet jo vuosikymmeniä sitten. Globaalisti kaukolämpö on monin paikoin huomattavasti energiatehokkaampi järjestelmä kuin käytössä olevat ratkaisut. Suomessa pyrittäessä edelleen vähentämään päästöjä, on kuitenkin otettava käyttöön uudempia päästöjen vähennyskeinoja ja kaukolämpöjärjestelmää täytyy kehittää eteenpäin.

Kaukolämmön tulevaisuuden näkymiin vaikuttaa etenkin sen roolin ja lämmön tarpeen kehitys. Rakentamisen kehittyminen kohti nollaenergiarakennuksia voi vähentää yksittäisten rakennusten lämmitystarvetta. Toisaalta kaupunkien väestömäärän oletetaan selvästi vielä kasvavan tulevaisuudessa, kun asutus keskittyy yhä enemmän kaupunkeihin. Tämä kaupunkien kasvu voi lisätä energian ja kaukolämmön tarvetta kaupungeissa, vaikka energiankäyttö tehostuisikin. Kulutusprofiilin lämpimän käyttöveden tarve säilyy todennäköisesti ennallaan asukasta kohti, mutta kasvaa kokonaisuudessaan kaupunkien asukasluvun kasvaessa. Ulkolämpötilasta riippuva tilojen lämmityksen kulutusprofiili puolestaan muuttuu ulkolämpötilan trendien ja rakentamisen energiatehokkuusvaatimusten mukaan. Ilmastomuutoksen myötä ennustetaan muutaman asteen keskilämpötilan nousua ja äärisääilmiöiden yleistymistä. Keskimääräinen lämpötilatrendi on siis lämpenevään suuntaan, mikä keskimäärin vähentää lämmitystarvetta. Tällöin myös lämmöntarpeen vuodenaikaiserot tasoittuvat. Samalla todennäköisyys poikkeaviin äärisääilmiöihin kasvaa, mikä ei vähennä huippu- ja varakapasiteetin tarvetta.

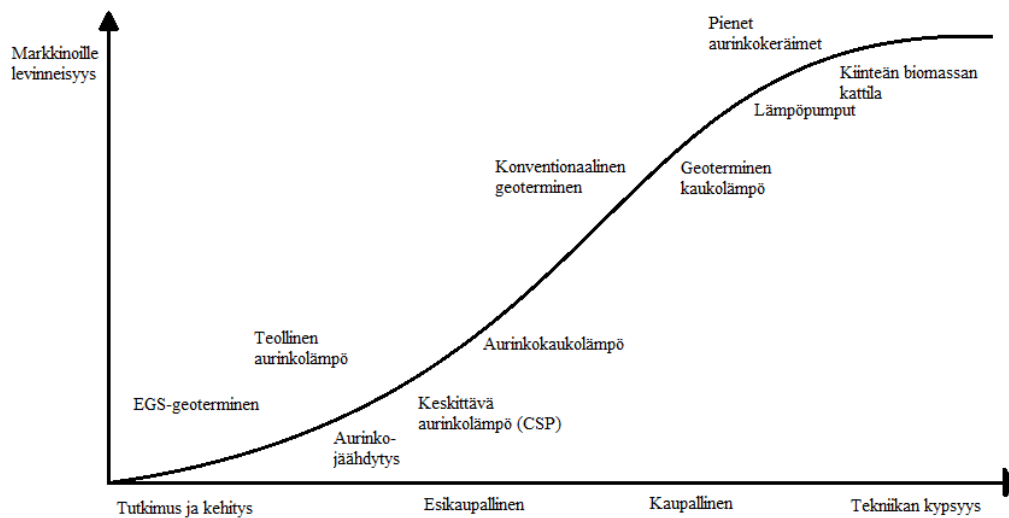
Rakennusten lämmöntarpeen väheneminen tulevaisuudessa on herättänyt myös kysymyksiä kaukolämpöjärjestelmän taloudellisesta kannattavuudesta lämmöntarpeen vähentäessä. Esimerkiksi Tanskassa tavoitteena on rakennusten tilojen lämmityksen tarpeen vähentäminen jopa 75 % nykyisestä tasosta. (Persson, Werner 2011) Persson ja Werner tutkivat kaukolämmön tulevaisuuden kilpailukykyä ja tulivat siihen johtopäätökseen, että koska kaukolämmönjakelun pääomakustannukset ovat suhteellisen alhaisia tiheästi asutuissa suurissa kaupungeissa, kaukolämpö säilyttää kilpailukykyä, vaikka lämmöntarpeen mittavat vähennystavoitteet toteutuisivatkin. Lämmitysmarkkinoiden tuleva kilpailu oletettiin tutkimuksen perusteella perustuvan uusiutuvien energianlähteiden käyttöön sekä fossiilisten polttoaineiden entistä tehokkaampaan käyttöön. Näistä ovat esimerkiksi kaukolämpö, energiatehokkuustoimenpiteet, ja esimerkiksi lämpöpumput. (Persson, Werner 2011)

Päästökaupan vaikutuksen myötä lämmityksen asiakaskustannukset voivat nousta, mikä saattaa mahdollistaa myös korkeampien pääomakustannusten hyväksymisen kaukolämpöjärjestelmissä. Kaukolämmön kilpailukyky riippuu kuitenkin lopulta kaukolämmön siirto- ja tuotantokustannusten erosta paikalliseen lämmitysvaihtoehtoon. Lisäksi lämmön kierrätyksen mahdollisuudet kaukolämpöverkon avulla vaikuttaa tärkeänä tekijänä myös kaukolämmön tulevaisuuden kilpailukykyyn. (Persson, Werner 2011)

Myös Lund et al. tutkimuksen mukaan rakennusten lämmitys kannattaa kuitenkin tässäkin tapauksessa tuottaa kaukolämpönä kaupungeissa. (Lund et al. 2010) Tämä edellyttää lisäksi, että kaukolämpöjärjestelmän käytössä on huomioitava myös jatkuva kehitys, kuten lämpötilojen vähittäinen alentaminen ja ylijäämälämpöjen enenevä hyödyntäminen. Lisäksi kehityksessä on huomioitava uusien teknologioiden integroiminen järjestelmään. Näitä teknologioita ovat muun muassa geotermien lämmöntuotanto, biokaasun tuotanto ja kiinteän biomassan käyttö. (Lund et al. 2010) Tutkimusten mukaan matalan lämpötilan kaukolämpö (*engl. LTDH, Low temperature district heating*) olisi kilpailukykyinen matalaenergiarakennuksille verrattuna muihin vaihtoehtoihin, kuten yksittäisiin lämpöpumppuihin. Matalan lämpötilan verkosto voisi toimia esimerkiksi lämpötiloilla 55–25°C. LTDH-kaukolämpö olisi kustannustehokas ja ympäristöystävällinen lämmönhankintamuoto lineaarisilla lämpöenergiatiheyksillä aina 0,20 MWh/m² a asti. (Dalla Rosa, Christensen 2011)

Toisaalta näkymiin vaikuttavat myös kansainväliset päästöjä vähennyssopimukset ja globaali tarve siirtyä käyttämään hiilidioksidipäästöjä energiaa tehokkaasti. Etenkin energiatehokkuus kannustaa lisäämään kaukolämmön osuutta kaupunkien lämmityksessä, sillä järjestelmä on energia- ja kustannustehokas kiinteistökohtaisiin ratkaisuihin verrattaessa. Tämä korostuu etenkin alueilla, joissa kaukolämmön jakeluinfrastruktuuri on jo olemassa sekä tiiviisti asutetuilla kaupunkialueilla, jossa tilaa ei ole rajattomasti käytettävissä. Myös kaukojäähdytyksen yhdistäminen kaukolämmön tuotantoon ja jakeluun lisää kokonaisuudessaan energiajärjestelmien hyötysuhdetta.

Suomessa kaukolämmön tuotannossa uusiutuvaa energiaa on tähän mennessä hyödynnetty lähinnä biopolttoaineiden muodossa. Euroopassa kiinnostus on kasvussa myös aurinkolämpöön ja geotermiseen energiaan, joista on jo käytössä useampia pilotti- ja kaupallisia laitoksia. Uusiutuvia energianlähteitä käyttävien lämmön ja jäähdytyksen tuotantoteknologioiden kehityksen nykytila on esitetty teknologian kehitystä kuvaavalla S-käyrällä International Energy Agencyn mukaan kuvassa 6. (IEA, 2014)



Kuva 6. Uusiutuvien lämmön ja jäähdytyksen tuotantoteknologioiden kehityksen nykytila esitettynä teknologian kehitysvauhtia kuvaavalla S-käyrällä. Kaavion lähdemateriaali: (IEA 2014)

Tulevaisuudessa voidaan kehittää myös älykkäitä kaukolämpö- ja -jäähdytysverkostoja sekä hyödyntää erilaisten yhteistuotantomuotojen etuja. Älykkäässä kaukolämpöjärjestelmässä uudet lämmönlähteet sekä lämmön ja kylmän kierrätyksen hyödyt voidaan paremmin hyödyntää verkon matalampien lämpötilojen avulla. Kysynnän joustolla voidaan parantaa järjestelmän toimivuutta kokonaisuudessaan ja lisätä järjestelmän hyötysuhdetta laitosten järkevämmän ajon seurauksena. (Pesola et al. 2011)

3 Hiilineutraalit termisen energian tuotantoteknologiat

Tässä luvussa esitellään työssä tutkitut hiilineutraalit lämpöenergianlähteet ja tuotantotekniikat. Kustakin käsitellään ensin lyhyesti teoreettiset periaatteet, jonka jälkeen keskitytään etenkin saatavuuteen, tekniikkaan ja sen kehittymiseen, sekä taloudellisiin perusteisiin vaikuttaviin tekijöihin. Tarkastelu tehdään kaukolämmön erillistuotannon näkökulmasta painottaen ominaisuuksia, jotka määrittävät teknologioiden soveltumisen eri teho-ryhmiin. Lopuksi on esitelty referenssikohteita maailmalla käytetyistä hiilineutraaleista lämmöntuotantotekniikoista kaukolämmön tuotannossa.

3.1 *Biomassan polttotekniikat*

Biomassa voidaan määritellä orgaaniseksi materiaaliksi, joka on elävää tai oli elävää lähimenneisyydessä. Biomassa syntyy fotosynteesissä hiilidioksidin ja veden muuntuessa hiilihydraatiksi ja hapeksi auringonvalon ja klorofyllin avulla. Biomassa on uusiutuvaa polttoainetta, sillä se ei tarvitse kehittyäkseen miljoonia vuosia, kuten fossiiliset polttoaineet vaan sitä muodostuu jo vuodessa merkittävä määrä. Biomassaa voidaan pitää hiilineutraalina polttoaineena, sillä ilmakehästä kasveihin absorboituu fotosynteesissä sama määrä hiilidioksidia, joka vapautuu poltettaessa. (Basu 2013)

Suomessa metsäbiomassa on yleisimmin käytettävä ja saatavilla oleva biopolttoaine. Puupohjainen biomassa eli lignoselluloosa koostuu pääosin selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Se ei ole yhtä helposti pilkottavissa kuin hiilihydraatit tai tärkkelys, eikä puupohjainen biomassa kilpaile ruuantuotannon kanssa. (Basu 2013) Metsäntutkimuslaitoksen viimeisimmän metsien inventoinnin tulosten mukaan Suomen metsien puuvaranto on noin 2,3 miljardia kuutiometriä ja vuosittainen kasvu 104 milj. m³. Inventoinnin perusteella suurin kestävä hakkuukertymäarvio energiapuulle yhteensä vuosina 2011–2020 on 20,5 milj. m³ /v ja vuosina 2020–2040 20,9 milj. m³ /v. (Luonnonvarakeskus 2015)

Biomassaraaka-aineista voidaan tuottaa biopolttoaineita monin eri tavoin. Tavallisimpia konversiotekniikoita ovat terminen ja anaerobinen kaasutus, pyrolyysi, haketus, pelletointi ja biodieselin valmistustekniikat. Biopolttoaineiden käytettävyyteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat lämpöarvo, kosteus- ja tuhkapitoisuus sekä haihtuvien aineiden ja kiinteän hiilen pitoisuus. Biopolttoaineet voidaan jakaa pääpiirteittäin ominaisuuksien mukaan kolmeen ryhmään: kiinteät, nestemäiset ja kaasumaiset biopolttoaineet. Biopolttoaineisiin perustuvien lämmöntuotantoteknologioiden käytettävyyteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat muun muassa polttoaineen saatavuus, kustannukset, valmistus- ja polttotekniikat. Etenkin nämä ominaisuudet vaikuttavat biopolttoaineiden soveltuvuuteen fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen.

3.1.1 Kiinteät biopolttoaineet ja kattilat

Kiinteiden biopolttoaineiden käyttöön ja polttotekniikan valintaan vaikuttaa merkittävästi biopolttoaineen laatu, sillä kiinteät biopolttoaineet ovat hyvin erilaisia koostumukseltaan. Biopolttoaineet poikkeavat ominaisuuksiltaan suurella määrällä toisistaan ja perinteisesti käytetyistä fossiilisista polttoaineista, joille perinteiset polttolaitokset on pääosin suunniteltu. Kiinteiden biopolttoaineiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2. käyttäen kivihiiltä vertailukohtana.

Taulukko 2. Kiinteiden biopolttoaineiden tyypillisiä koostumuksia Eurooppalaisen standardin CEN 335 mukaan vertailukohteena hiili. d= dry basis (kuiva) (Frederiksen, Werner 2013)

| Ominaisuus | Kivihiili | Puu (ilman kuorta) | Kuori | Metsätähde (havupuut) | Paju | Olki |
|---------------------------------------|-----------|--------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|
| Tehollinen lämpöarvo MJ/kg (d) | 26–28,3 | 18,5–20 | 18,5–23 | 18,5–20 | 18,4–19,2 | 17,4 |
| Kosteuspitoisuus w-% | 6–10 | 50–60 | 45–65 | 50–60 | 50–60 | 17–25 |
| Tuhkapitoisuus (d) | 8,5–10,9 | 0,4–0,5 | 2–3 | 1–3 | 1,1–4,0 | 5 |
| C, % (d) | 76–87 | 48–52 | 48–52 | 48–52 | 47–51 | 45–47 |
| H, % (d) | 3,5–5 | 6,2–6,4 | 5,7–6,8 | 6–6,2 | 5,8–6,7 | 5,8–6,0 |
| N, % (d) | 0,8–1,5 | 0,1–0,5 | 0,3–0,8 | 0,3–0,5 | 0,2–0,8 | 0,4–0,6 |
| O, % (d) | 2,8–11,3 | 38–42 | 24,3–40,2 | 40–44 | 40–46 | 40–46 |
| S, % (d) | 0,5–3,1 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | 0,02–0,10 | 0,05–0,2 |
| Cl, % (d) | <0,1 | 0,01–0,03 | 0,01–0,03 | 0,01–0,04 | 0,01–0,05 | 0,14–0,97 |
| K, % (d) | 0,003 | 0,02–0,05 | 0,1–0,4 | 0,1–0,4 | 0,2–0,5 | 0,69–1,3 |
| Ca, % (d) | 4–12 | 0,1–1,5 | 0,02–0,08 | 0,2–0,9 | 0,2–0,7 | 0,1–0,6 |

Metsähaketta ja metsätähdehaketta syntyy metsätalouden sivutuotteena. Erilaiset metsähakkeet poikkeavat poltto-ominaisuuksiltaan jonkin verran toisistaan. Erityisesti kosteusprosentti vaihtelee hakelaaduittain. Hakkeen sekä purun ja kuoren hinta PIX Forest Biomass Index:in mukaan on ollut viime vuosina luokkaa 20 €/MWh (12.5.2015) (FOEX Indexes Ltd 2015). Haketta on myös helppo varastoida, sillä varastointi ei välttämättä vaadi erillistä siiloa tai rakennusta. Toisaalta varastointi vaatii suhteessa paljon tilaa, koska hakkeen energiatiheys muihin polttoaineisiin verrattuna ei ole kovinkaan suuri. Hakkeen käyttö vaatii tyypillisesti kostealle ja kiinteälle polttoaineelle soveltuvan laitoksen.

Puupelletti on polttoaineena ominaisuuksiltaan parempi kuin metsähake, sillä pelletti omaa pienemmän kosteuspitoisuuden ja sitä myötä suuremman energiatihedyyden. Puupellettien tehollinen lämpöarvo on tyypillisesti saapumistilassa 14–17,5 MJ/kg ja kosteusprosentti on 8–10 %. (Alakangas 2000) Puupelletin varastointi ei vaadi suhteessa yhtä paljon tilaa kuin metsähakkeen varastointi, mutta polttoaine tulee säilyttää kuivassa ja siksi vaaditaan yleensä säiliö. Pelletin hinta on ollut PIX Pellet Nordic Index:in mukaan luokkaa 30 €/MWh (21.4.2015) (FOEX Indexes Ltd 2015)

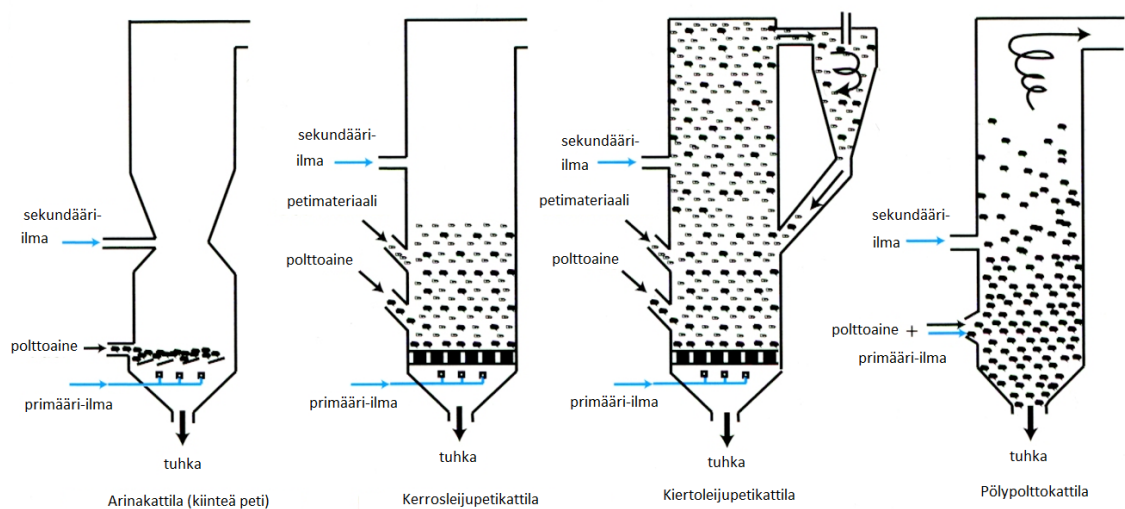
Torrefioitu pelletti on lämpökäsittelyn ansiosta saatu ominaisuuksiltaan enemmän hiilen kaltaiseksi, jotta sillä voitaisiin korvata hiiltä polttoaineena olemassa olevissa laitoksissa. Torrefioitua pellettiä voidaan kutsua myös paahtopelletiksi, puuhiileksi, jalostetuksi pelletiksi tai biohiileksi. Torrefiointi tehdään verraten matalassa lämpötilassa 200–300 °C. (van der Stelt et al. 2011) Torrefioitu pelletti on jatkokäsitellympää ja kalliimpaa polttoainetta kuin tavallinen puupelletti, ja se ei ole vielä laajasti kaupallinen tuote. Laajojen markkinoiden puutteessa polttoaineen hinta ja sen kehitys sisältää paljon epävarmuustekijöitä.

Höyrypelletti eli höyryräjäytystekniikalla (*engl. steam explosion*) valmistettu pelletti on joidenkin tutkimusten mukaan lujuudeltaan ja kosteudensietokyvyltään torrefioitua pellettiä parempi. Höyryräjäytysprosessissa biomassaa altistetaan kylläiselle höyrylle 180–240 °C lämpötiloissa eripituisilla viipymisajoilla, mikä aiheuttaa puun ainesosien, selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin hajoamista sekä mekaanisilla että kemiallisilla muutoksilla. Prosessissa puuaineen sisällä oleva vesi laajenee adiabaattisesti ja aiheuttaa so-
luosille autohydrolyysin. (Biswas et al. 2011)

Peltobiomassa saadaan esimerkiksi energiakasvien viljelystä tai maatalouden ja elintarviketeollisuuden biomassoista. Monipolttoainelaitoksissa voidaan hyödyntää usein myös tämän tyyppisiä koostumukseltaan vaihtelevia biomassoja. Koostumuksen vaihtelut täytyy kuitenkin huomioida myös polttotekniikka suunniteltaessa ja mahdollisesti savukaasujen puhdistuksessa. Esimerkiksi olki polttoaineena voi aiheuttaa kuumakorroosiota. Kuumakorroosiota kuitenkin auttaa vähentämään lämpökattiloissa tulipesän putkissa kiertävä kaukolämpövesi CHP-laitoksissa kiertävän korkean lämpötilan höyryn sijaan. Olki sisältää myös klooria, joten suolahapon (HCl) läsnä ollessa myös matalan lämpötilan korroosion riski tulee huomioida. (Frederiksen, Werner 2013)

Jätepuuta syntyy Suomessa Metsäntutkimuslaitoksen vuonna 2011 julkaiseman raportin arvion mukaan vuosittain noin 850 000 tonnia, josta 670 000 tonnia on peräisin rakentamisesta ja rakennusten purkamisesta. Valtaosa tästä puujätteestä syntyy Helsinki-Tampere-Turku akselilla. Raportin mukaan teknillistaloudellisesti järkevin käyttötapa tälle jättepuulle on polttaminen energiaksi. (Pirhonen et al. 2011) Tällaisten jätebiomassojen etuna voi olla erittäin pienet tai jopa negatiiviset polttoainekustannukset. Toisaalta polttoaineen koostumuksessa voi olla tällöin suuria vaihteluja, jotka voivat vaikuttaa poltto-
prosessiin ja monipolttoainevaihtoehto tulee huomioida jo laitoksen suunnittelussa.

Kiinteitä biopolttoaineita voidaan polttaa niille soveltuviissa kattilatyypeissä, joita ovat esimerkiksi kierto- ja kerrosleijupetikattilat, arinakattilat ja pölypolttokattilat. Näiden neljän kiinteän polttoaineen kattilan konfiguraatiot on esitetty kuvassa 7. (Frederiksen, Werner 2013) Parhaiten monille biopolttoaineille soveltuvia kattiloita ovat usein leijupetikattilat, sillä näissä voidaan polttaa energiatehokkaasti suhteellisen kosteidenkin polttoaineita. Tasalaatuisempia ja kuivempia polttoaineita voidaan polttaa pölypolttokattiloissakin. Kiinteiden biopolttoaineiden käytössä on myös huomioitava polttoaineen saatavuus, logistiikka, käsittely, vastaanotto, varastointitilan tarve ja varmuusvarastointikapasiteetti. Kiinteän polttoaineen kattilat eivät ole yleensä yhtä nopeasti säädettävissä ja käynnistettävissä kuin nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita käyttävät laitokset.

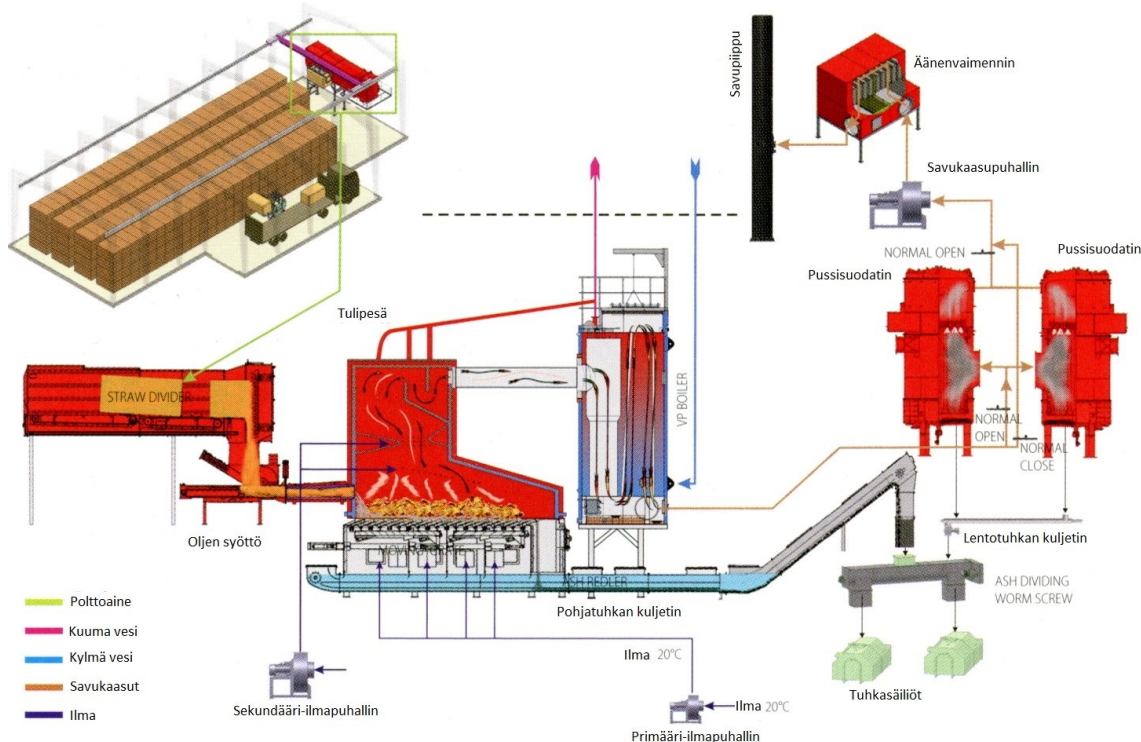


Kuva 7. Kiinteän polttoaineen yleisimmät kattilatyypit. (Frederiksen, Werner 2013)

Pölypolttokattilaa voidaan käyttää hiilen polttamisen lisäksi myös puun ja turpeen poltossa, mikäli nämä polttoaineet ovat tarpeeksi kuivia eli sisältävät alle 15 % kosteutta, ja polttoaine on rakenteeltaan suhteellisen homogeenista. Yhteiskuntajäte ei tavallisesti esimerkiksi poltettavaksi pölypolttokattilassa, mutta pelletit ja muu kuiva polttoaine soveltuvat. (Frederiksen, Werner 2013)

Arinakattila on kattilatyypeistä vanhin ja sitä on käytetty myös hiilen polttamiseen, ennen pölypolttotekniikan kehitystä. Niitä käytetään edelleen yleisesti etenkin poltettaessa laadultaan sellaista biomassaa ja jätettä, jotka eivät sovellu pölypolttoon. Tällöin tyypillinen kokoluokka on enimmillään 20 MW. Arina voi olla horisontaalisessa tasossa liikkuva tai kallistetussa tasossa ja värisevä. Palamisilma syötetään tulipesään sekä alakautta että ylhäältä. Ilman syöttö sekä primäärisesti että sekundäärisesti vähentää tarvittavaa ilman ylimäärää. Stoikimetrisessä palamisessa tarvittava ilmakerroin $\lambda=1$, mutta joissain kattiloissa se voi olla jopa yli 1,5. Tuhka kerätään arinakattilan pohjalta ja lähes koko prosessi on yleensä automaattinen lukuun ottamatta polttoaineen vastaanottoa. Kuvassa 8. on esitetty arinakattilalämpölaite. (Frederiksen, Werner 2013)

Erilaisia arinarakenteita ja niihin liittyviä tulipesiä voidaan myös suunnitella ominaisuuksiltaan erilaisille kiinteille polttoaineille. Etenkin pienen yksikkökoon laitoksissa monipuolisuutta lisää myös valmistajien suuri määrä ja erilaiset paikalliset tarpeet. Arinapoltoissa etuina on mahdollisuus polttoaineen polttamiseen suurina partikkeleina ja alhainen omakäyttötehon tarve. Haittoina puolestaan on korkea ilmakerroin (1,3–1,4), huono säädettävyyden (hitaat säätöominaisuudet), herkkyys polttoaineen laadulle eli partikkelikoon tasalaatuisuus, suuri palamattoman aineen määrä, epätäydelliseen palamiseen liittyvät päästöt ja liikkuvien arinautojen huollon tarve. (Jalovaara et al. 2003)



Kuva 8. Kattilalaitos liikkuvalla arinalla, kaukolämpöteho 12 MW, polttoaineena olki. (Frederiksen, Werner 2013)

Leijupetikattilat perustuvat leijutustekniikkaan, jossa polttoainepartikkelit saatetaan virtaavan aineen kaltaiseen tilaan leijupetimateriaalin kanssa johtamalla primääri-ilma kattilaan pedin läpi alhaalta päin sellaisella nopeudella, että partikkelit saavat tarpeeksi nostetta. Petimateriaali on yleensä hiekkaa. Kuplivassa kerrrosleijupedissä (*engl. BFB, bubbling fluidized bed*) virtausnopeus on riittävä nostamaan partikkelit ilmaan, niin että pedin pinta näyttää kuplivan. Kiertoleijupedissä (*engl. CFB, circulating fluidized bed*) virtausnopeus on niin suuri, että partikkelit nousevat kokonaan tulipesän yläosaan, josta palamaton aine, tuhka ja hiekka kiertävät savukaasujen mukana syklonin kautta takaisin tulipesään. Etuna on, että savukaasujen puhdistusjärjestelmään siirtyvä lentotuhkan määrä on suhteellisen pieni. Esimerkiksi SO_2 -päästöjä voidaan myös vähentää suoraan tulipesässä lisäämällä kalkkikiveä (CaCO_3) tai dolomiittia ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) leijupetiin. Lisäksi palamislämpötilaa voidaan kontrolloida ja pitää matalammalla tasolla 800–950 °C välillä, mikä vähentää NO_x -päästöjen syntymistä verrattuna muille kattiloille tyypilliseen 1200–1650 °C-asteeseen. Tämän takia leijupetikattiloita pidetään verraten ympäristöystävällisinä. (Frederiksen, Werner 2013, Jalovaara et al. 2003)

Leijupedissä tyypillistä on hyvä kaasun ja kiintoaineen sekoitus sekä pedin suuri lämpökapasiteetti, mikä mahdollistaa huonolaatuisen, matalalämpöarvoisen ja kostean polttoaineen polton hyvällä palamishyötysuhteella myös osakuormilla. Leijupedit soveltuvat tästä syystä myös monipolttoainekattiloiksi. Niissä on lisäksi pieni huollon tarve, sillä se sisältävät vain vähän liikkuvia osia ja palamislämpötila on tuhkan pehmenemis- ja sulamislämpötilojen alapuolella. Toisaalta pedin suuresta painehäviöstä johtuen leijupetikattilan omakäyttöteho on korkea. Myös pedin voimakkaan sekoittumisen sekä pelkistävien tai hapettavien olosuhteiden vuoksi pedissä sijaitsevat lämmönsiirtoputket ovat alttiina eroosiolle, jota voidaan estää pinnoittamalla putket kulutusta kestäväällä materiaalilla, kuten muurauksilla. Leijupedissä ei yleensä tarvita merkittävästi polttoaineen esikäsitelyä. Kiertoleijukattilan etuna on erityisesti matalammat typenoksidi- ja rikkidioksidipäästöt, kun taas kerrosleijukattila soveltuu paremmin myös hyvin kosteille ja matalalämpöarvoisille polttoaineille ja kattilamuutoksille sekä omaa yksinkertaisemmasta rakenteesta johtuen pienemmät kustannukset. Nykyisin käytössä olevat leijupetikattilat toimivat yleensä atmosfäärisessä paineessa, kun taas paineistetut leijupetikattilat ovat vielä kehitystyön alla. (Jalovaara et al. 2003)

3.1.2 Nestemäiset biopolttoaineet

Nestemäiset biopolttoaineet prosessoidaan tyypillisesti energiasisällöltään tiheämpään muotoon kuin kiinteät biopolttoaineet. Toisaalta niiden valmistusprosessit ovat endotermisiä eli vaativat energiaa. Nestemäisten biopolttoaineiden valmistamisella tavoitellaan mahdollisuutta korvata suoraan nestemäisiä fossiilisia polttoaineita, kuten kevyttä tai raskasta polttoöljyä niille suunnitelluissa laitoksissa. Nestemäisten biopolttoaineiden ominaisuuksia polttoöljyihin vertailtuna on koottu taulukkoon 3.

Käytetyt polttoöljyt on yleensä jaettu käyttöominaisuuksiensa mukaan kevyisiin (KPÖ) ja raskaisiin (RPÖ) polttoöljyihin. Kevyet polttoöljyt ovat monikäyttöisiä polttoaineita, sillä ne ovat helposti juoksevia, käsiteltäviä ja palavia tisleitä, ja niiden polttaminen onnistuu ilman monimutkaisia ja kalliita laitteita. Raskas polttoöljy on edullisempaa, mutta käsittely ja polttaminen vaativat enemmän huoltoa ja kalliimpia laitteita. Öljyä on käytössä nykyisin pääosin käynnistys- ja varapolttoaineina, sillä ne on helppo varastoida, omaavat korkean lämpöarvon, ovat helppoja pumpata, käyttö on helposti automatisoitavissa ja niiden toimitus on yleensä varma ja nopea. Polttoöljyjen käytön kannalta niiden tärkeimpiä ominaisuuksia ovat yleensä viskositeetti, rikkipitoisuus ja jähmepiste. Muita luokiteltavia ominaisuuksia ovat tiheys, tehollinen lämpöarvo, leimahduspiste, tuhkapitoisuus, vesipitoisuus, mekaaniset epäpuhtaudet, hiiltojäännös sekä alkuaineanalyysi. (Jalovaara et al. 2003)

Rikkipitoisuus puolestaan rajoittaa joidenkin enemmän rikkiä sisältävien polttoöljyjen käyttöä. Kevyen polttoöljyn rikkipitoisuus on tyypillisesti selvästi alle 1 %, noin 0,1–0,2 %, ja se voidaan myös laskea alle 0,05 % tehostamalla jalostamoprosessin rikinpoistoa. Raskaan polttoöljyn rikkipitoisuus taas vaihtelee 1–5 % välillä. (Jalovaara et al. 2003) Euroopan Unionin teollisuuspäästöjä rajoittava direktiivi on ehdotettu astumaan voimaan

vuoden 2016 alussa, mikä rajoittaa etenkin rikkipäästöjä ja vaatii lisäämään joko rikin-puhdistustekniikkaa tai käyttämään vähärikkisiä polttoaineita raskaan polttoöljyn laitoksissa. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2010)

*Taulukko 3. Nestemäisten biopolttoaineiden ominaisuuksia verrattuna polttoöljyihin. *(Jalovaara et al. 2003). ** (Hoekman et al. 2012) *** VTT*

| Ominaisuus | RPÖ* | KPÖ* | Biodiesel- öljy (FAME) | Uusiutuva dieselöljy | Nopea mänty-pyro- lyysiöljy*** |
|--|-------------------|------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Tehollinen lämpöarvo MJ/kg | 41,0–41,3 | 42,4–42,7 | 39 | 44 | |
| Viskositeetti, mm²/s @ 40 °C | @50°C 95–370 | @50°C 2,2–6 | 4–5 | 3–4 | |
| Vesi w-% | 0,25–0,3 til-% | 0,1–0,2 til-% | | | 23,9 |
| C, w-% | | | 76,2 | 84,9 | 53,3 |
| H, w-% | | | 12,6 | 15,1 | 6,5 |
| O, w-% | | | 11,2 | 0,0 | 40 |
| S, w-% | 0,85–0,95 | <0,05–0,5 | | | |

Biodiesel viittaa yleensä mihin tahansa dieseliä korvaavaan biopolttoaineeseen ja se on valmistettu tyypillisesti kasviöljyistä tai eläinrasvoista. Biodieseliä voidaan käyttää suoraan diesel-koneissa tai tavallisen dieselin kanssa sekoitettuna ilman muutoksia moottoriin tai vain pienin muutoksin. (Biswas et al. 2011) Biodieseliä voidaan valmistaa esimerkiksi Fischer Trops –menetelmällä, jossa synteettisiä hiilivetyjä tuotetaan hiilimonoksidin (CO) ja vetykaasun (H₂) seoksesta. Fischer Trops –menetelmää kuvaa reaktioyhtälö: CO + 2H₂ -> (CH₂) + H₂O. Prosessi sisältää myös ennen tätä biomassan esikäsittelyn, kaasutuksen, kaasun puhdistuksen, kaasun prosessoinnin, sekä varsinaisen FT-synteesin ja FT-jatkojalostuksen, jossa käytetään vetykrakkausta. Kaasutus tapahtuu 700–800 °C-asteen lämpötilassa leijupetikaasuttimessa hapen läsnä ollessa. Koko prosessissa syntyy paljon sivutuotteita, kuten lämpöä ja sähköä, jotka voidaan käyttää myös hyödyksi. Tällä menetelmällä valmistettua biodieseliä voidaan kutsua myös termillä HVO eli vetykäsitelty kasviöljy (*engl. Hydrotreated vegetable oil*). (Natarajan et al. 2014)

Toinen vaihtoehtoinen biodieselin valmistustapa on jatkuva transesteröintiprosessi. Tällöin biodieselistä voidaan valmistustavan erottamiseksi käyttää myös kemiallista termiä FAME eli rasvahappometyyliesteri (*engl. Fatty Acid Methyl Ester*) (Biswas et al. 2011)

Pyrolyysiöljy on biomassan termokemiallinen hajoamistuote. Pyrolyysiprosessi tapahtuu hapettimien puuttuessa tai läsnä ollessa vain hyvin rajallisesti, jolloin kaasuntuumista ei tapahdu merkittävässä määrin. Pyrolyysissä suuret hiilivetymolekyylit hajoavat yksiker-
taisemmiksi molekyyleiksi, ja lopputuotteina syntyy kaasua, nesteitä ja kiinteää tuhkaa. Syntynyt pyrolyysi- tai bioöljy on tyypillisesti ruskeaa, tummanpunaista tai mustaa. Se

on tiheydeltään yleensä noin 1,2 kg/l ja sisältää 14–33 wt-% vettä, joka ei ole helposti poistettavissa. Bioöljyn tyypillinen ylempi lämpöarvo on 15–22 MJ/kg, joka on selvästi alempi kuin fossiilisen poltto-öljyn 43–46 MJ/kg. Matalampi lämpöarvo johtuu pääasiassa hapettuneiden yhdisteiden läsnäolosta. (Biswas et al. 2011) Pyrolyysiprosessit voidaan luokitella nopeisiin ja hitaisiin pyrolyyseihin. Pyrolyysiöljyn tuotantoprosessi vaatii lämpöä ja siinä voidaan hyödyntää esimerkiksi sähkön ja lämmön yhteistuotantolämpöä lämmityskauden ulkopuolella. Haasteina ovat pyrolyysiöljyn huono säilyvyys ja sen sisältämän haitalliset ja korrosoivat aineet sekä kaasumaiset päästöt.

Bioraakaöljyä voidaan tuottaa myös hydrotermisessä nesteytysprosessissa, jolloin saatu öljy sisältää 10–20 wt-% happea ja omaa lämpöarvon välillä 33–36 MJ/kg. Tavallista raakaöljyä huomattavasti suurempi happipitoisuus (10–20% vs. <1 %) aiheuttaa pienemmän energiapitoisuuden, huonon termisen stabiiliuden, alhaisemman haihtuvuuden, suuremman korrosoivuuden ja taipumuksen polymerisoitua ajan kuluessa. Tyypilliset reaktio-olot prosessissa ovat 280–380°C, 70–20MPa, veden läsnäolo ja 10–60 min reaktio-aika. (Biswas et al. 2011)

Öljyjen poltossa käytetään tavallisesti siihen suunniteltuja öljypolttimia. Ennen öljyn johtamista polttimelle on tavallisesti ensin paineenkorotusvaihe sekä viskositeetin pienentäminen öljyn esilämmityksellä, tarvittaessa myös puhtauden varmistus suodatuksella. Öljypolttimilla öljy hajotetaan pieniksi pisaroiksi tai kaasutetaan, jolla varmistetaan syttyminen sekä sekoitetaan öljyn ja palamisilma riittävän nopeasti ja tehokkaasti. Polttimia on kahta päätyyppiä: höyrytyspolttimia ja hajotuspolttimia. Polttimina yleisemmin käytetään jälkimmäisiä ja ne jakautuvat vielä hajotustavan mukaan pyöriväkuppisiin, öljynpainehajotteisiin, tulopainesäätöisiin, paluupainesäätöisiin, höyryhajotteisiin ja ilmahajotteisiin polttimiin. (Jalovaara et al. 2003)

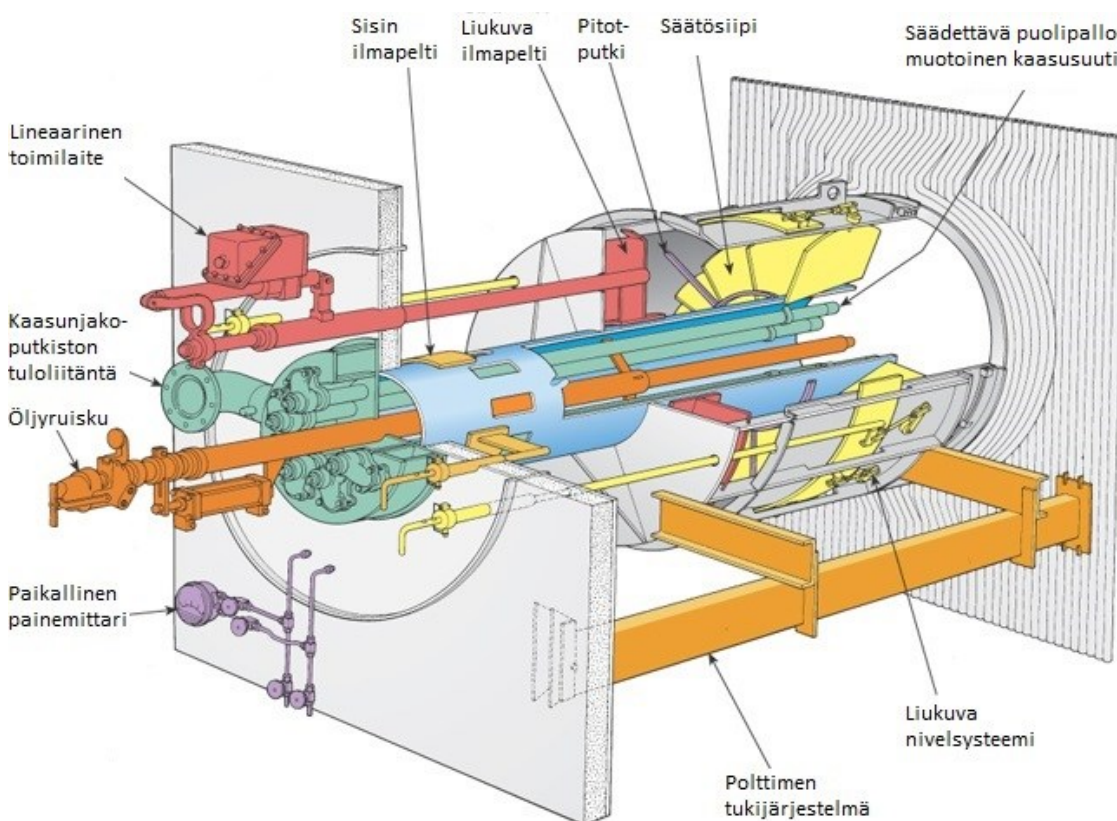
Nestemäisiä ja kaasumaisia biopolttoaineita voidaan polttaa olemassa olevissa fossiilisille öljyille ja maakaasulle suunnitelluissa kattiloissa tietyillä edellytyksillä. Biopolttoaineilla on yleensä tarkoitus korvata fossiilisia polttoaineita, mutta olemassa olevat laitokset on suunniteltu ja optimoitu yleensä jonkin fossiilisen polttoaineen polttoon. Osa laitoksista ja kattiloista on joustavampia polttoaineen suhteen, mikäli ne on suunniteltu valmiuteen käyttää useampia eri polttoaineita. Monesti kuitenkin laitokset on suunniteltu suhteellisen spesifeiksi polttoaineen suhteen ja laitokselle optimaaliselle polttoaineelle on olemassa tarkat rajat.

3.1.3 Biokaasut

Biokaasut voidaan jakaa tuotantoteknologian mukaan kahteen pääluokkaan: termisesti ja anaerobisesti tuotettuihin biokaasuihin. Biokaasujen koostumus vaihtelee tuotantotavan mukaan, mutta yleensä ne sisältävät pääosin metaania tai vetyä ja muita synteetikaasuja, kuten hiilimonoksidia. Termisellä tuotantoteknologialla paljon energiaa kuluu ensin biomassan kuivaamiseen. Anaerobisessa tuotannossa eli mädättämällä tuotettuna biokaasu puolestaan sisältää vain suhteellisen vähän puhdasta metaania ja paljon epäpuhtauksia. Nykyään on kehitteillä myös muita uusia biokaasujen tuotantotapoja, kuten biologisesti

mikrobeilla tuotettu kaasu ja määrän biomassan kaasutus ylikriittisessä vedessä. Nämä uudemmat teknologiat vaativat vielä kuitenkin paljon lisää tutkimusta ja kehitystä ennen kaupallista käyttöönottoa.

Tyypillisesti Suomessa kaasuverkkoon syötetty maakaasu sisältää noin 98 % metaania ja kaasun ylempi lämpöarvo on $39,8 \text{ MJ/m}^3$ eli $55,3 \text{ MJ/kg}$ ja tehollinen lämpöarvo on $36,0 \text{ MJ/m}^3$ eli $50,0 \text{ MJ/kg}$. Eri lähteistä tuotettujen kaasujen koostumus voi vaihdella hie-man, mutta poltettaessa pääkomponentti on kuitenkin metaani. Synteettisten biokaasujen haasteena on metaanipitoisuuden nostaminen riittävän korkeaksi. Eri energiakaasut luokitellaan kolmeen kaasuryhmään niiden lämpöarvosta ja tiheydestä lasketun Wobbe-arvon perusteella. Suomessa kaasuverkossa käytettävä maakaasu kuuluu toiseen kaasuryhmään ja sen alaryhmään H (=korkean lämpöarvon maakaasu). Samassa kaasulaitteessa tai polttimessa voidaan käyttää vain Wobbe-arvoltaan hyvin lähellä olevia kaasuja ilman suuttimen tai paineensäätimen muutoksia. (Suomen Kaasuyhdistys 2014)



Kuva 9. Kaasu- ja öljypoltin (Low- NO_x). (Babcock & Wilcox Enterprises Inc. 2015)

Anaerobisesti eli mädättämällä tuotetun biokaasun tuottamiseen on pääpiirteittäin kaksi eri teknologista vaihtoehtoa: märkämädätys ja kuivamädätys. Termisesti kaasuttamalla voidaan myös tuottaa biokaasua eli synteettistä biokaasua, josta käytetään myös termejä bio-SNG (engl. *synthetic natural gas*), synteetikaasu, kaasutuskasvu tai tuotekasvu. Bio-massan terminen kaasutus tapahtuu tyypillisesti osittain hapettavissa olosuhteissa ja yli 800°C . (van der Stelt et al. 2011) Kaasuttimena voidaan käyttää yleensä leijukerroskaa-

sutinta tai vastavirtakaasutinta. Näistä jälkimmäinen vaatii kuitenkin huomattavaa biomassan esikäsittelyä vaadittavan pienen partikkelikoon takia. Lämpötilan kaasutuksessa täytyy olla myös hyvin korkea, välillä 1000 – 1300 °C, mikä johtaa huonoon metaanin ja muiden hiilivetyjen pitoisuuteen synteesikaasussa. Leijukerroskaasuttimissa esikäsittelyä vaaditaan selvästi vähemmän ja käytetyt lämpötilatkin ovat matalampia, noin 900 °C. Kuitenkin synteesikaasua tarvitsee jatkojalostaa katalyyttisesti, jotta hiilivetyjen ja tervan pitoisuuksia saadaan vähennettyä. (Pinto et al. 2010)

Kaasumaisia biopolttoaineita voidaan polttaa olemassa olevissa maakaasulle suunnitelluissa kattiloissa tietyillä edellytyksillä. Samassa kaasulaitteessa tai polttimessa voidaan käyttää vain Wobbe-arvoltaan hyvin lähellä olevia kaasuja ilman suuttimen tai paineen-säätimen muutoksia. (Suomen Kaasuyhdistys 2014) Lisäksi biokaasut sisältävät yleensä kuitenkin jonkin verran epäpuhtauksia, ja muita aineita kuin puhdasta metaania, ja biokaasut on yleensä jalostettava laadultaan riittävän puhtaiksi, jotta niillä voitaisiin korvata maakaasua. Maakaasuverkkoon syötettävä puhtaaksi jalostettu biokaasu vastaa ominaisuuksiltaan lähes täysin maakaasua ja sen poltto onnistuu ilman muutoksia. Tällöin muutostointikustannuksia ei siis aiheudu, mutta jalostetun biokaasun tuotanto omaa siinä huomattavat tuotantokustannukset.

3.2 Aurinkolämpö

Aurinkolämmöllä kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuotanto voidaan toteuttaa joko keskitetysti suurella aurinkokeräinjärjestelmällä, hajautetusti rakennuskohtaisilla keräimillä tai näiden hybridiratkaisulla molempia yhdistelemällä. (Frederiksen, Werner 2013) Aurinkolämpöä voidaan myös hyödyntää passiivisesti esimerkiksi kaukojäähdytyksen yhteydessä kierrättämällä rakennusten keräämää auringonenergiaa jäähdytysverkoston kautta. Yleisimmin käytetyt keräintyyppit ovat tasokeräimet ja tyhjiöputkikeräimet, joissa kiertävä lämmönsiirtoneste kuljettaa auringon energian lämminvesivaraajaan. (Jiandong et al. 2015)

Maapallon ilmakehän ulkopuolella saatava auringon säteilyn määrä pinnan normaalia kohti on 1373 W/m², jota kutsutaan aurinkovakioksi. Ilmakehän läpi kulkiessaan säteily vaimenee noin puoleen ja lisäksi maan pinta-alalle jaettuna se vähenee vielä noin neljäsosaan, sillä maan aurinkoon päin oleva poikkileikkaus vastaa noin neljäsosaa maapallon pinta-alasta. Siispä keskimääräinen vuorokauden aikaisen säteilyn keskiarvo maanpinnalla on noin 170 W/m². (Rabl 1985)

Aurinkokeräimet ovat periaatteeltaan tiettyntyyppisiä lämmönvaihtimia, jotka muuntavat auringon säteilyenergian väliaineen sisäenergiaksi. Aurinkokeräimet ovat jokaisen aurinkolämpöjärjestelmän pääkomponentteja. Aurinkokeräin on laite, joka absorboi tulevan auringonsäteilyn, muuttaa sen lämmöksi ja siirtää lämmön virtaavaan aineeseen, joka on yleensä vettä, ilmaa, öljyä tai muuta lämmönsiirtonestettä. Auringon säteilystä kerätty energia kierrätetään laitteen läpi virtaavan aineen mukana joko suoraan käyttöön tai lämpövarastoon. Aurinkokeräimet voidaan jakaa joko ei-keskittäviin tai keskittäviin ke-

räimiin, joiden erona on että keskittävissä keräimissä auringonsäteily yleensä kohdistetaan heijastinpintojen avulla tiettyyn kohtaan, mikä lisää säteilyn vuota, kun taas ei-keskittävissä sama pinta-ala vastaanottaa ja absorboi säteilyä. Liikkumattomia ei-keskittäviä keräimiä on kolmea päätyyppiä: tasokeräimet, tyhjiöputkikeräimet ja kiinteät paraboliset kourukeräimet. (Kalogirou 2004)

Aurinkolämpökeräimien hyötysuhde η voidaan laskea yhtälöllä: (Hakkarainen et al. 2015)

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{G} a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (4)$$

Tässä optinen hyötysuhde η_0 , kuvaa keräimen absorbanssia, eli sitä osuutta keräimen pinnalle saapuvasta säteilystä, joka absorboituu keräimeen. Lämpöhäviöitä kuvaavat kertoimet a_1 ja a_2 ovat valmistajan ilmoittamia mallikohtaisia parametreja. Esimerkiksi Savo-Solar SF500-06 suurkeräimellä (kuva 10.), jonka pinta-ala on $10,7 \text{ m}^2$, optinen hyötysuhde on $\eta_0 = 96,1 \%$. Lämpöhäviöihin vaikuttaa auringonsäteilyn voimakkuus G ja ne ovat verrannollisia keräimessä kiertävän lämmönsiirtonesteen keskilämpötilan T_c ja ulkoilman lämpötilan T_∞ erotukseen.

Tasokeräimet ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, kestäviä, vaativat vain vähän huoltoa, omaavat hyvän hyötysuhteen ja pienet tuotantokustannukset. (Jiandong et al. 2015) Kylmän ilmaston olosuhteissa lämmönsiirtonesteenä yleisesti käytettyyn veteen on lisättävä glykolia tai muuta ainetta, joka estää nestettä jäätymästä. Glykolin ominaislämpökapasiteetti on kuitenkin pienempi kuin veden ja viskositeetti on suurempi, mikä vaatii suurempaa nestetilavuutta ja pumppaustehoa. Kesällä haasteena on nesteen kiehumisriski joutuessa pitkien päivien aiheuttamasta altistuksesta ja pienestä lämpimän veden tarpeesta. Tällöin kiehuessa glykoli aiheuttaa haittaa putkille. (Paradis et al. 2015)



Kuva 10. Tasokeräinkenttä lämmöntuotannossa Helsingin Sakarinmäessä. (Arha 2015)

Tyhjiöputkikeräimet ovat myös pitkään käytössä ollut teknologiaa ja niillä on etuna tyhjiöeristys lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Tämä on huomattava etu etenkin Suomen kaltaisissa kylmän ilmastoin maissa sekä kaukolämmön korkeamman lämpötilan menoveden tuottamiseen. (Jiandong et al. 2015)

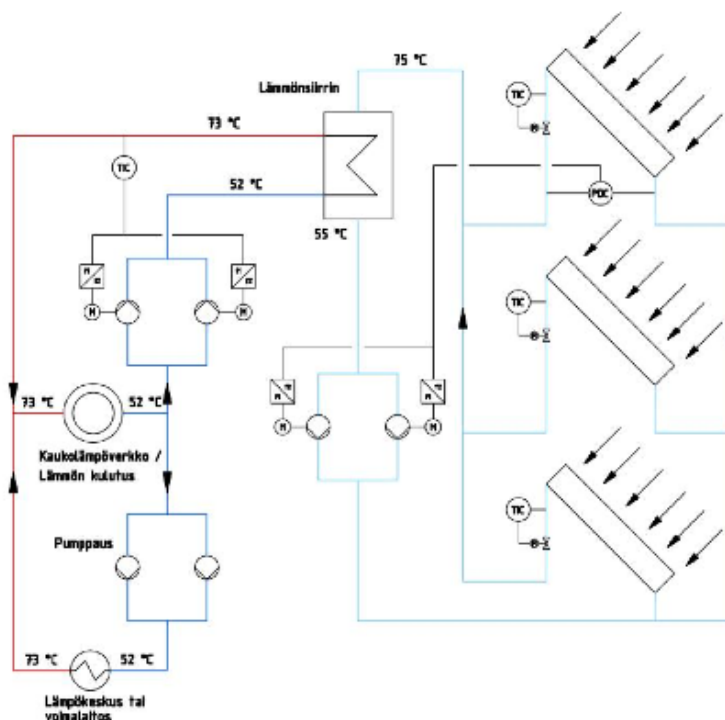
Keskittävä aurinkovoima (*engl. CSP, Concentrated Solar Power*) perustuu teknologiaan, jossa peilit kohdistavat auringon säteilyenergian haluttuun kohteeseen. Yleensä CSP-voimamat sopivat parhaiten alueille, joissa saadaan paljon suoraa säteilyä, esimerkiksi yli 2000 kWh/m²/a. (Cavallaro 2009) CSP-voimaloissa keskitetyllä säteilyllä voidaan tuottaa höyryä, jolla tuotetaan edelleen sähköä. Kuitenkin Suomen olosuhteissa suoran säteilyn määrä ei ole kovin suuri, esimerkiksi Helsingissä keskimääräinen säteily on 2,73 kWh/m²/d eli 996,45 kWh/m²/a, mikä on alle puolet vähimmäissuosituksista ja sisältää myös epäsuoran säteilyn (NASA 2015). Näin ollen olosuhteet eivät ole kovin optimaaliset CSP-voimaloille.

Aurinkolämpöjärjestelmät voidaan luokitella myös pääpiirteittäin keskitettyihin ja hajautettuihin järjestelmiin. Pohjoismaissa keskitetylle lämpölaitokselle taloudellisin sijainti on usein keräinkenttä maassa lämmityslaitoksen vieressä, mutta tiheämmin asutussa Keski-Euroopassa keskitetty laitos tarkoittaa usein tietyn asuinalueen rakennusten katoilla olevaa toisiinsa kytkettyä järjestelmää kaukolämpöverkon avulla, sillä ylimääräistä tonttitilaa pelkkään lämmöntuotantoon ei juuri ole. Kustannusystävällisimmän ratkaisun asuinrakennusten lämmitykseen kaikista aurinkolämmitysjärjestelmistä tarjoavat tällaiset keskitetyt aurinkolämpölaitokset, sillä kiinteistökohtaisissa ratkaisuissa lämpöhäviöt ja järjestelmäkustannukset ovat aina suhteessa isommat. Suuren mittakaavan taloudellisessa aurinkolämmön hyödyntämisessä tärkeä edellytys on olemassa oleva kaukolämpöjärjestelmä. (Schmidt et al. 2004)

Keskitettyjen järjestelmien etuna on yksittäisen keräimen kustannusten pieneneminen selvästi, kun kokonaiskeräinpinta-ala kasvaa. Yksittäisen keräimen kustannukset muodostuvat kausivarastollisen järjestelmän yhteydessä, spesifeistä investointikustannuksista ja lämpöhäviöistä. Tämä teknologia on globaalissakin mittakaavassa vasta kehitteillä, mutta etenkin Tanskassa, Itävallassa, Saksassa ja Ruotsissa, on rakennettu jo useampia laitoksia ja varastoja. Suurin näistä on teholtaan 12 MW_{th}, ja sijaitsee Marstalin kaupungissa Tanskassa. (Frederiksen, Werner 2013)

Aurinkolämmön hyödyntäminen aurinkokeräimillä on teknologialtaan yksinkertaista, mutta tyypillisesti suurin haaste muodostuu lämmöntarpeen ja aurinkolämmön tuotannon ajallisesta vastakkaisuudesta. Ulkolämpötilat laskevat samalla kun auringon energiaa on vähemmän lämmittämässä ilmaa ja maata. Etenkin maapallon napa-alueiden lähellä talviaikaan, jolloin on myös suurin lämmöntarve, auringon energian saatavuus on huono. Toisaalta aurinkolämmön käyttö kaukojäähdytyksessä on paremmin ajallisesti yhteydessä aurinkolämmön saatavuuteen, jonka huippu osuu samaan aikaan kuin jäähdytyksen tarpeen huippu. Kaukojäähdytystä voidaan tuottaa auringonlämmöllä käyttämällä esimerkiksi lämpölähteisiä jäähdyttimiä, kuten absorptiojäähdyttimiä. Aurinkolämpö puoles-

taan tarvitsee varastointia kattaakseen myös kylmimmän vuodenajan lämmöntarvetta. Ilman varastointia aurinkolämpöjärjestelmää ei välttämättä kannata mitoittaa yli kesäajan lämmöntarpeen, eli tällöin tuotanto voidaan mitoittaa enimmillään kaukolämpöverkon lämpimän käyttöveden kulutuksen mukaan. Kustannuksiltaan aurinkolämpö painottuu voimakkaasti investointikustannuksiin. Aurinkolämpölaitoksen kytkentä kaukolämpöverkkoon on esitetty kuvassa 11. (Lahtinen 2013)

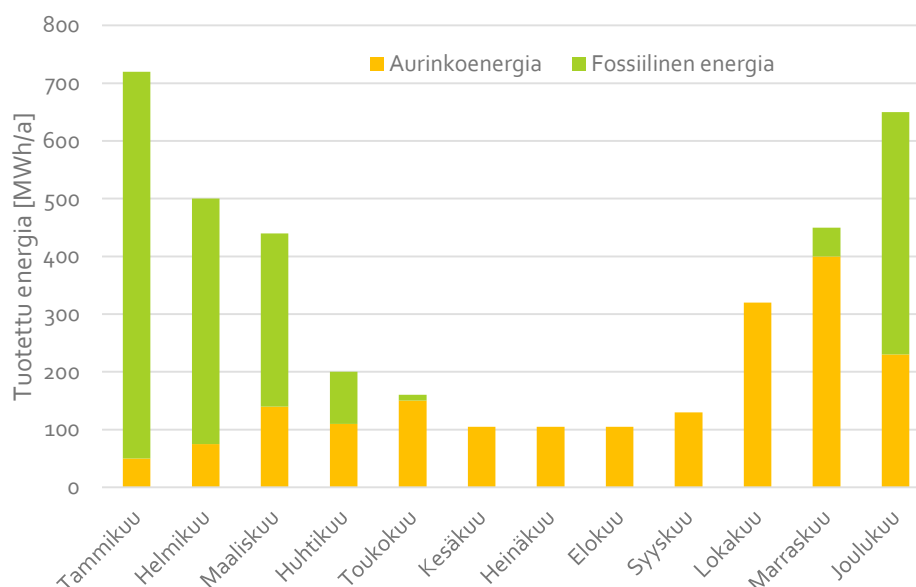


Kuva 11. Aurinkolämpölaitoksen kytkentä kaukolämpöverkkoon. (Lahtinen 2013)

Suomessa aurinkolämmön mahdollisuuksia on tutkittu muun muassa Gaia Consulting Oy:n julkaisemassa raportissa ”Aurinkolämmön mahdollisuudet kaukolämpöjärjestelmässä”, jossa todettiin pääpiirteittäin, että aurinkolämpöjärjestelmän koon kasvaessa taloudellinen kannattavuus ja energiatehokkuus kasvavat. Tämä johtuu siitä, että kustannus suhteessa keräinpinta-alaan ja samalla tuotetun aurinkolämmön kustannus pienenevät ja energian varastoinnin tehokkuus ja hyötysuhde kasvavat. Näillä perusteilla keskitetyt aurinkolämpöjärjestelmät ovat energiatehokkaampia ja taloudellisesti kannattavampia kuin hajautetut aurinkolämpöjärjestelmät. Kustannustehokkaat ja yleistymässä olevat tyhjiöputkikeräimet mahdollistavat mitoituslämpötilojen mukaisen, riittävän korkean lämpötilan veden tuottamisen kaukolämpöverkkoon. Edistyneimmissä aurinkolämpöä kaukolämpöverkossa hyödyntävissä maissa kustannukset näyttävät laskeneen jo perinteisen tuotannon kanssa kilpailukykyiselle tasolle, mutta Suomessa kehitys vaatisi vielä kotimarkkinoiden kasvua, jotta keräimien hinnat ja asennuskustannukset laskisivat. (Tahkonen et al. 2011)

Keskitetty aurinkolämpölaitos kausittaisella varastoinnilla (engl. CSHPSS, *Central solar heating plants with seasonal storage*) mitoitetaan yleensä kattamaan yli 50% kokonaislämmöntarpeesta. Tätä suuremmilla osuuksilla tarvittavien varastojen koot kasvavat suu-

riksi, mikäli käytetään vesivarastoja. (Schmidt et al. 2004) Kuvassa 12. nähdään kausittaisen varaston vaikutus aurinkolämmön kulutukseen etenkin loka-, marras- ja joulukuussa, jolloin aurinkolämmön kulutus on ensin suurimmillaan ja vähenee sitten varaston huvetessa. Suuremman mittakaavan aurinkolämpöjärjestelmiä on rakennettu Euroopassa enimmäkseen Keski- ja Pohjois-Eurooppaan, kuten Ruotsiin, Tanskaan, Alankomaihin, Saksaan ja Itävaltaan. (Schmidt et al. 2004)



Kuva 12. Kuukausittainen simuloitu energiatase kausivarastoidulla aurinkolämpöjärjestelmällä Friedrichshafenissa Saksassa. (Schmidt et al. 2004)

Kausittaisella varastoinnilla aurinkolämmössä voidaan päästä myös parhaassa tapauksessa hyviin suuriin aurinko-osuuksiin (*engl. SF, solar fraction*) vuosittaisen lämmöntarpeen kattamisesta. Esimerkiksi Drake Landing Solar Community Kanadassa käyttää aurinkolämpöjärjestelmää, jossa on putkireikävarasto (*engl. BTES, Borehole thermal energy storage*) ja joka on tuottanut jopa 97 % kyseisen yhteisön vuosittaisesta rakennusten lämmityksen energiantarpeesta. Flynn ja Siren tutkivat tähän liittyen, miten sijainti ja suunnittelu vaikuttavat tällaisen järjestelmän suorituskykyyn laatimalla mallin yhteisöstä ja simuloimalla sitä eri sijainneissa, joita olivat Helsinki, Hohhot, Dublin, Oviedo ja Perpignan. Tulokset osoittivat, että talojen eristystä lisäämällä ja käyttämällä matalamman lämpötilan lämmitysjärjestelmiä, voidaan huomattavasti lisätä järjestelmän aurinkosuutta (SF). Matalan lämpötilan käyttö lämmitysjärjestelmässä voi kuitenkin samalla alentaa BTES-varaston hyötysuhdetta, joka riippuu paljon myös paikallisista maaperän ominaisuuksista. Jokaisessa sijainnissa todettiin kuitenkin olevan mahdollista saavuttaa erittäin korkeat aurinko-osuudet (>95 %), kunhan sopivat muutokset tehdään tarvittaessa alkuperäiseen suunnitelmaan. (Flynn, Sirén 2015)

Vaikka kaikissa kohteissa voitiin saavuttaa erittäin korkeat aurinko-osuudet, vaati se joissakin kohteissa hieman enemmän modifiointeja kuin toisissa. Esimerkiksi Helsingissä SF saavutti arvon 49 % viidentenä vuonna, mutta sitä voitiin korottaa selvästi (87 %) alenta-

malla lämmöntarpeen määrää lisäämällä passiivitalojen määrää. Sitä voitiin edelleen korottaa (jopa 96 %) laskemalla lisäksi lämpimän käyttöveden lämpötilaa. (Flynn, Sirén 2015)

Keskitetty aurinkolämpölaitos päivittäisellä varastoinnilla (engl. CSHPDS, *Central solar heating plant with diurnal storage*) suunnitellaan yleensä kattamaan 10-20% vuosittaisesta kokonaislämmöntarpeesta tai käytännössä 80-100% lämpimän käyttöveden tarpeesta kesäkuukausina. (Schmidt et al. 2004)

Mikäli käytettävissä oleva tila aurinkolämpöjärjestelmälle on hyvin rajallinen, voi hajautettu järjestelmä olla joissain tapauksissa tilantarpeeltaan keskitettyä järjestelmää käytännöllisempi, mikäli hajautetut aurinkolämpökeräimet voidaan sijoittaa rakennusten katoille. Tällöin tarvitaan kuitenkin yleensä myös ala-asemia aurinkolämmön kytkemiseksi kaukolämpöverkkoon, ja kokonaisjärjestelmän sekä varastoinnin toteutusvaihtoehtoja on monia. (Paulus, Papillon 2014) Paulus et al. tutkivat hajautetun aurinkolämmön parametreja yhdistettynä kaukolämpöverkkoon, ja totesivat että kaikilla järjestelmän eri konfiguraatioilla kaukolämmön matala toimintalämpötila oli optimaalisin järjestelmän hyötysuhteelle. Mikäli matala lämpötila ei kuitenkaan ole mahdollista, osalla järjestelmäkonfiguraatioista saatiin vähennettyä termisen hyötysuhteen alenemista. Korkean lämpötilan aurinkokeräimillä saatiin vähennettyä hyötysuhteen laskua, samalla nostoen verkon paluulämpötilaa. Tasoitettun tuotantokustannuksen (engl. LCOH, *Levelized Cost of Heat*) laskettiin vaihtelevan välillä 56 – 161 MWh/€. (Paulus, Papillon 2014)

Aurinkolämpöä voidaan hyödyntää myös passiivisesti, kunhan se otetaan huomioon rakennusten suunnittelussa käyttäen ikkunapinta-alojen optimointia ilmansuuntien mukaan ja auringon varjostimia. Esimerkkinä passiivisen aurinkolämmön hyödyntämisestä on SunZEB-konsepti eli aurinkoenergiaa hyödyntävä lähes passiivitalo. Kaukojäähdytyksen kautta myös talojen keräämä aurinkoenergia voidaan hyödyntää kaukolämmityksessä kierrättämällä se kaukojäähdytyksen paluuputkia pitkin. Tämä edellyttää, että järjestelmässä hyödynnetään lämmön ja -jäähdytyksen yhteistuotantoa.

3.3 Geoterminen energia

Geotermisellä energialla on useita etuja verrattuna muihin uusiutuviin ja uusiutumattomiin energianlähteisiin ja siksi paljon potentiaalia tuottaa ympäristöystävällistä, luotettavaa ja kustannuksiltaan kohtuullista kaukolämpöä. Geotermiset laitokset voivat toimia peruskuormana tai arvioidun kuorman mukaan joustavana kapasiteettina, eikä niiden käyttö ole altis muuttuville polttoainekustannuksille. Maan pällinen pinta-alan tarve on geotermisellä energialla suhteellisen pieni ja verrannollinen laitoksen tehoon. Päästöt ovat lähellä nollaa ja teknologia on suhteellisen yksinkertaista. Syy miksi geotermistä energiaa ei ole vielä runsaammin käytössä piilee riskeissä ja epävarmuuksissa jatkuvan lämmöntuoton suhteen maanalaisista esiintymistä, sekä suuriin esiintymien tutkimus- ja porauskustannuksiin. Kuitenkin kehittyvän teknologian ansiosta on arvioitu, että geotermisestä energiasta voi tulla maailmanlaajuisesti merkittävä energianlähde tämän vuosisadan aikana. (Beckers et al. 2014)

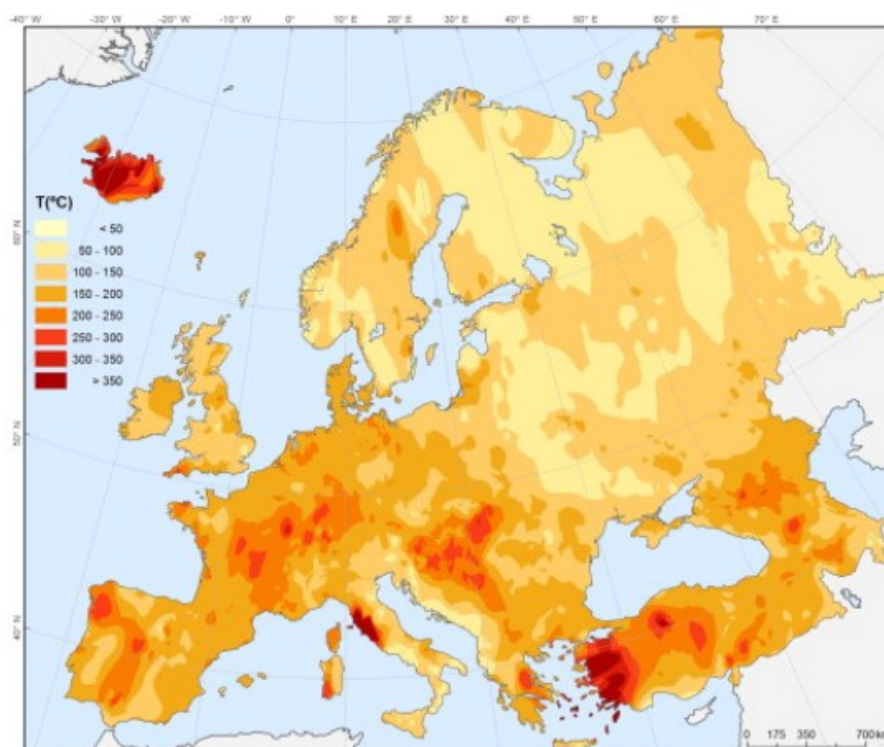
Geotermistä energiaa on hyödynnetty vuosikymmeniä sekä lämmön että sähkön tuotannossa alueilla, joilla sitä on helposti saatavilla. Muilla alueilla ja globaalissa mittakavassa käyttö on jäänyt kuitenkin vähäiseksi. (Frederiksen, Werner 2013) Nykysin kuitenkin syvältä porattavan geotermisen energian (*engl. EGS, Enhanced Geothermal System*) käyttö myös matalan lämpötilan geotermisillä alueilla on lisääntymässä maailmalla kehittyneen poraus- ja lämmönsiirtoteknologian ansiosta. EGS-tekniikan avulla voidaan hyödyntää geotermistä energiaa myös alueilla, joilla maaperä voi olla huonosti läpäisevää tai vain vähän huokosia sisältävää kiveä. EGS-teknologiassa geotermistä energiaa saadaan hyödynnettyä hydraulisesti stimuloimalla, jolloin maaperän läpäisevyys lämmönsiirtonesteen suhteen lisääntyy. Kun lämmönsiirtonesteenä useimmin käytettävää vettä kierrätetään maaperässä, kivimassaan varastoitunut termien energia siirtyy osaksi nesteeseen. Järjestelmän mitoituksessa tulee ottaa huomioon kivimassa ominaisuudet siten, että maaperästä palaava neste on oikeassa lämpötilassa eikä energialähde ehdy nopeasti. (Beckers et al. 2014) Euroopassa käytössä olevien geotermisten kaukolämpöjärjestelmien tunnuslukuja on esitetty taulukossa 4. (Huculak et al. 2015)

Taulukko 4. Perustunnuslukuja geotermisistä lämmitysalueista Euroopan maissa. (Huculak et al. 2015)

| Maa | Kapasiteetti [MW_{th}] | Vuosittain tuotettu energia [TJ/v] | Kaukolämpöalueiden määrä | Suunniteltujen kaukolämpöjärjestelmien määrä 2013–2018 |
|-------------------------|---|---|-------------------------------------|---|
| Alankomaat | 50,5 | 982,0 | 7 | 21 |
| Iso-Britannia | 2,8 | 0,0 | 1 | 8 |
| Italia | 70,7 | 165,7 | 16 | 47 |
| Puola | 98,1 | 159,6 | 5 | 14 |
| Ranska | 316,2 | 1200,2 | 41 | 109 |
| Romania | 106,6 | 150,1 | 12 | 31 |
| Ruotsi | 33,0 | 270,0 | 1 | 1 |
| Saksa | 171,3 | 311,6 | 23 | 120 |
| Slovakia | 14,2 | 0,0 | 4 | 18 |
| Slovenia | 3,7 | 6,3 | 3 | 10 |
| Tanska | 33,0 | 289,0 | 3 | 18 |
| Tšekin tasavalta | 6,6 | 25,0 | 1 | 4 |
| Unkari | 83,1 | 1282,5 | 15 | 54 |

Geotermisen energian määrän kasvua syvyyden mukana kuvaa geotermien gradientti. Euroopassa on useita alueita, joilla geotermiset entalpiat ovat enemmän otollisia kuin toisilla. Näillä alueilla geotermistä energiaa on jo hyödynnetty pidempään. Esimerkiksi Saksassa ja Ranskassa on käytössä laitoksia, joiden poraussyvyyydet yltyvät keskimäärin noin 2-3 kilometriin. Kuvassa 13. on esitetty geotermisen gradientin vaikutus ja arvioidut lämpötilat 6,5 km syvyydessä Euroopassa. Kuvasta nähdään, että Suomen maaperä omaa

suhteessa matalan geotermisen gradientin. Maaperän lämpötilat eivät ole välttämättä riittäviä sähköntuotantoon ja lämmöntuotantoon riittävän korkean lämpötilan tavoittamiseksi joudutaan poraamaan syvemmälle. Syvemmälle poraamisen edellytykset ovat kuitenkin parantuneet liuskekaasun ja -öljyntuotannon myötä kehittyneen porausteknologian ansiosta. Suomessa tarvittavan poraussyvyyden, jolloin lämpötila on luonnostaan riittävän korkea kaukolämpöveden tuotantoon, on arvioitu olevan Etelä-Suomen alueella noin 6-7 km, jolloin saadaan pumpattua 120 asteista vettä. Kuvassa 13. Etelä-Suomen alue 6,5 km syvyydellä on merkitty lämpötilavälille 100–150 °C. (Chamorro et al. 2014)



Kuva 13. Arvioitu lämpötilakartta 6500 m syvyydessä Euroopassa. (Chamorro et al. 2014)

Suomessa geotermisen EGS-tekniikan soveltamista tutkitaan St1:n pilottiprojektissa. Pilottiprojektissa Espoon Otaniemessä porataan arviolta 6-7 km syvyinen geotermisen kaivo, jonka tavoitteena on tuottaa 40 MW lämpötehoa. Projekti toteutetaan vaiheittain sisältäen ensin 2 km koeporauksen, jolla tutkitaan maaperän laatua tarkemmin. Tämän jälkeen voidaan porata ensimmäinen kaivo 6-7 km syvyyteen, jonka jälkeen kallio paineistetaan pumppaamalla sinne vettä. Toinen kaivo porataan paineistamalla luotuun vesiesiintymään, jonka jälkeen veden kierrättäminen esiintymässä voidaan aloittaa. Maaperästä nousevaa lämpöä voidaan sitten siirtää lämmönvaihtimien kautta suoraan kaukolämpöverkkoon. Pilottiprojektin edetessä saadaan empiiristä tietoa geotermisen energian hyödynnettävyydestä Suomen maaperässä. (Saarno et al. 2015)

Ottaen huomioon riskit ja epävarmuudet sekä suuret alkuinvestointikustannukset EGS-projekteissa, maaperän lämmön esiintymien ja suunnitellun laitoksen mallintaminen ja simulointi etukäteen on tärkeää. Näin voidaan arvioida laitoksen tekninen ja taloudellinen

suorituskyky, sekä vertailla geotermistä energiaa muihin energianlähteisiin. Mallinnusta ja simulointia tarvitaan myös laitoksen parhaan sijainnin valintaan ja järjestelmän optimointiin kyseiseen sijaintiin. Lisäksi voidaan kehittää optimaalinen esiintymän hallintastrategia tai ennustaa laitoksen tulevaa toimintaa perustuen aiempaan käyttöhistoriaan. (Beckers et al. 2014) Useissa tutkimuksissa on painotettu geotermisen energian roolia merkittävänä osana tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmiä rajallisia biomassavarantoja tarvittaessa muihinkin käyttökohteisiin. (Østergaard, Lund 2011, Alberg Østergaard et al. 2010)

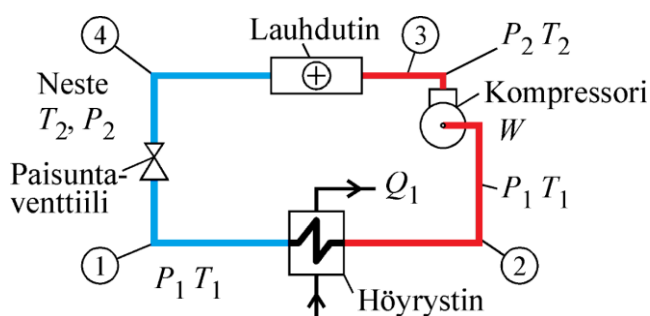
3.4 Ympäristön lämmön ja ylijäämälämpöjen hyödyntäminen

Ympäristön lämmönlähteitä ja matalan lämpötilan hukkalämpöjä voidaan hyödyntää lämpöpumppujen sekä lämmönsiirtimien avulla. Teollisuuden korkealämpötilaisia ylijäämälämpöjä voidaan siirtää kaukolämmitysverkkoon helposti lämmönsiirtimillä, mutta tähän ei syvennytä tässä tarkemmin, sillä nämä teollisuuden sekundäärilämmönlähteet ovat jo nykyisin laajalti hyödynnetty. Sen sijaan tässä keskitytään matalalämpötilaisiin lämmönlähteisiin, joita ei vielä ole laajalti hyödynnetty ja jotka vaativat lämpötilan korotusta, jotta lämpö voidaan syöttää kaukolämpöverkkoon.

Lämpöpumpuilla voidaan tuottaa sekä lämpöä että jäähdytystä samanaikaisesti.

Lämpöpumpun höyrystimen puolen paine on matalampi, jolloin lämmönsiirtoaine höyrystyy. Höyrystyminen vaatii lämpöenergiaa, joka saadaan höyrystimenä toimivan lämmönsiirtimen kautta ympäristöstä. Samalla höyrystimen läpi toisessa piirissä kulkeva lämmönsiirtoneste jäähtyy ja tätä voidaan hyödyntää jäähdytyksessä. Kompressorin korottaa lämmönsiirtoaineen painetta, jolloin lämmönsiirtoaineen lämpötila kohoaa.

Lämmönsiirtoaine luovuttaa ympäristöönsä energiaa lauhtuttimella palatessaan nestemäiseen olotilaan. Tämän jälkeen lämmönsiirtoaine kulkee paineenalennusventtiilin läpi ja kierros alkaa uudestaan. (Mustafa Omer 2008) Lämpöpumpun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Lämpöpumpun toimintaperiaatteen prosessikaavio.

Lämpöpumppujen käytön kannattavuus perustuu niiden korkeaan hyötysuhteeseen (*engl. COP, Coefficient Of Performance*), jolla lämpöpumppu kuluttaa sähköä ja tuottaa lämpöä, sekä mahdollisuuteen hyödyntää ympäristön ja matalan lämpötilan lämmönlähteitä, joita voidaan pitää ilmaisina lämmönlähteinä. COP-luku kuvaa siis, kuinka monta yksikköä lämpöä lämpöpumppu tuottaa, kun se kuluttaa yhden yksikön sähköä.

3.4.1 Maalämpöpumput

Maalämpöpumput toimivat edellä mainitulla tavalla ja lämmönlähteenä käytetään maaperää. Maalämpöpumppuja käytetään laajasti kiinteistöjen lämmittämiseen etenkin kaukolämpöverkon ulkopuolella. Maalämpöpumppujen COP-luku on tyypillisesti välillä 2,5–4,0 riippuen lämmönkeruupiirin lämpötilasta sekä tuotetusta lämpötilatasosta. (Mustafa Omer 2008)

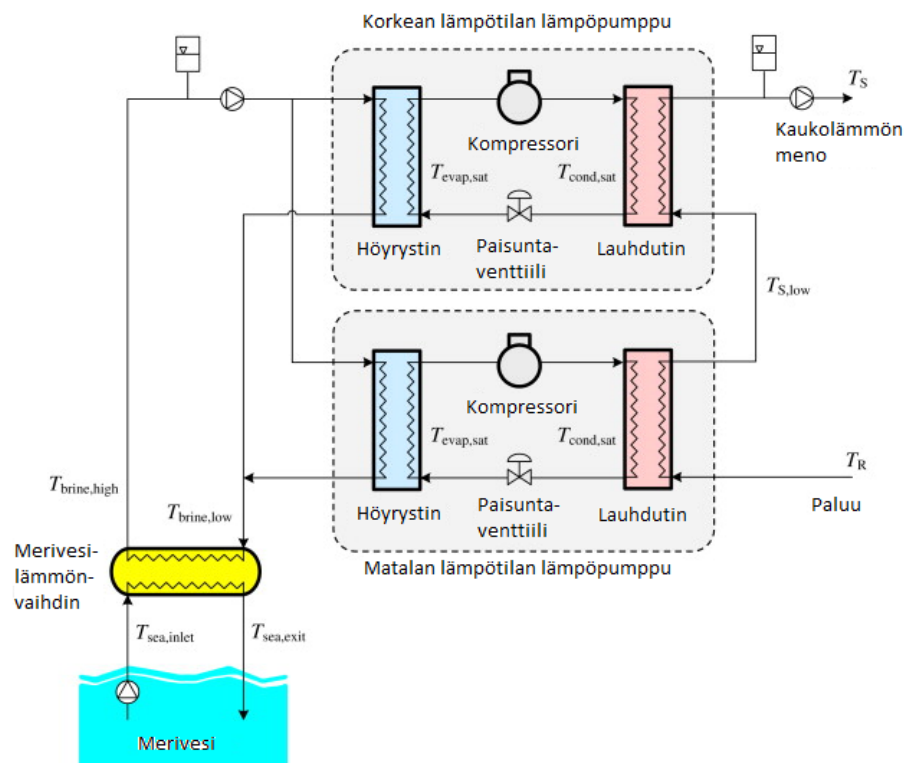
Maalämpöpumpun energiakeruupiiri voi olla asennettuna joidenkin metrien syvyyteen maan pinnan suuntaisesti tai vaihtoehtoisesti maanpintaan kohtisuorasti sijoittuvaan maalämpökaivoon. Maalämpökaivon tyypillinen porausyvyys on 100–500 metriä. Porakaivot ovat vaakasuuntaisia lämmönkeruupiirejä käytännöllisempiä, sillä vaakasuuntaiset kaivot voivat vaurioitua, mikäli niiden alueelle tehdään muita rakennustöitä. Porakaivoja ei voi kuitenkaan rakentaa liian lähekkäin, sillä tällöin lämpökaivot pääsevät jäähtymään liian paljon. Tämän seurauksena lämpöpumpun höyrystimelle tulevan nesteen lämpötila laskee, mikä vastaavasti huonontaa lämpöpumpun COP-lukua. Pahimmassa tapauksessa lämmöntuotanto joudutaan lopettamaan, mikäli höyrystimen lämpötila ei riitä höyrystämään lämmönsiirtonestettä. Ongelmallista kaukolämmön tuotannon näkökulmasta on myös kaukolämmön ja maaperän lämpötilojen ero. Mitä suurempi höyrystimen ja lauhduttimen välinen ero on, sitä huonompaan hyötysuhteeseen päädytään. Kaukolämmön tuotannossa lieneekin tarpeellista kytkeä lämpöpumppuja sarjaan, jotta tarvittava lämpötilataso (80–115°C) saavutetaan. (Laukkanen, Naumov 2013)

Maalämpö eroaa geotermisen energian määritelmästä sen suhteen, että maalämpöpumppu käyttää pääosin maan pintakerrokseen varastoitunutta auringon energiaa, eikä varsinaisesti maan sisäistä geotermistä energiaa, joka syntyy lähemmäs maan ydintä vajonneiden raskaiden alkuaineiden hajoamisen säteilystä. Toisinaan näitä termejä käytetään kuitenkin ristiin ja joitakin epäselvyyksiä on välimuotojen suhteen. (Frederiksen, Werner 2013)

3.4.2 Merivesilämpöpumput

Meren terminen energia on vapaasti käytettävissä rannikkoseuduilla. Merivesilämpöpumput toimivat kuten maalämpöpumput, mutta niiden energiankeruupiirinä toimii merivesi. Meriveden ja lämmönsiirtoputkiston välillä on maalämpökaivoa parempi lämmönjohtavuus, minkä seurauksena tarvittava lämmönsiirto-pinta-ala on pienempi suurimman osan vuodesta. Lämpöpumppuja voitaisiin asentaa suurien kiinteistöjen kellaritiloihin, olemassa oleviin kaukolämpötunneleihin sekä olemassa olevien energialaitosten tonteille. Lämpöpumppujärjestelmät voitaisiin myös sijoittaa kompakteihin uusiorakennuksiin, sillä lämpöpumppulaitokset eivät ole dimensioiltaan kovinkaan suuria. Merivesilämpöpumppuja on käytössä muun muassa Ruotsissa ja Norjassa. Ruotsissa suurin Tukholmassa sijaitseva merivesilämpöpumppulaitos on teholtaan 180 MW ja Oslossa on 26 MW lämpöpumppulaitos. (Zhen et al. 2007)

Zhen et al. tutkivat merivesilämpöpumpun hyödyntämistä kaukolämmön- ja jäähdytyksen tuotannossa Pohjois-Kiinassa Dalianin satamakaupungissa. Merivesilämpöpumpulle tärkeitä parametreja ovat meriveden lämpötila ja meriveden syvyys. Tutkimusten mukaan $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ on matalin meriveden lämpötila, jota lämpöpumppu voi hyödyntää. Sisäänoton syvyydestä ja etäisyydestä rannikkoon puolestaan riippuu tarvittavan putken pituus, joka vaikuttaa suurelta osin investointikustannuksiin. (Zhen et al. 2007) Talvella Suomessa meriveden lämpötila on $0\text{--}4$ asteen välillä ja kesällä rannikon lähellä merivedet lämpiävät $15\text{--}25$ asteeseen. Lisäksi meren suolaisuus asettaa vaatimuksia lämmönkeruupiirissä käytettäville materiaaleille. Mikäli vedenotto voidaan järjestää sopivaan syvyyteen, saadaan vesi tarpeeksi lämpimänä lämpöpumpulle ympäri vuoden, mutta kesän kohonneen veden lämpötilan tuoma hyöty häviää.



Kuva 15. Sarjaan kytkettyjen merivesilämpöpumppujen kytkentäkaavio. (Baik et al. 2014)

Kuvassa 15. on esitetty merivesilämpöpumppujen kytkentäperiaate. Ero maalämpöpumpun on lämmönkeruupuolella sijaitseva merivesilämmönsiirrin, joka estää suolaisen meriveden pääsyn lämpöpumpuun. Lisäksi kuvasta nähdään kuinka lämpöpumput voidaan kytkeä sarjaan COP-luvun parantamiseksi. Baik et al. tutkimuksen mukaan 2, 3, ja 4 pumppu sarjaan kytkentä nosti 8-14 % vuosittaista suorituskykyä. (Baik et al. 2014)

3.4.3 Matalan lämpötilan ylijäämälämpöjen hyödyntäminen

Ylijäämälämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa vähentää primäärienergian tarvetta ja lisää samalla energiatehokkuutta. Ylijäämälämmöiksi voidaan luokitella kaikki lämpöenergia, jota tuottaja ei itse voi käyttää. (Broberg et al. 2012) Matalan lämpötilan ylijäämälämpöjä voidaan hyödyntää korottaen lämpötilaa lämpöpumpuilla kaukolämmön menoveden lämpötilatasolle.

Teollisuuden ja palveluiden ylijäämälämpöjen hyödyntäminen edellyttää kartoitusta, jotta voidaan selvittää näiden määrä, saatavuusajankohta ja -paikka. Potentiaalisia ylijäämälämmönlähteitä ovat esimerkiksi teollisuus ja konesalit. Tällaisista teollisuudenprosesseista lämpöä voidaan saada tasaisesti, kun taas palveluteollisuuden palveluiden käyttö ja ylijäämälämpöjen tuotto voi vaihdella voimakkaasti päivittäin ja kausittain, eikä vaihtelu välttämättä kohtaa lämmöntarpeen vaihteluiden kanssa. Kustannukset kaukolämpöverkoon liittamisestä riippuvat aina paljolti yksittäisestä tapauksesta, etenkin kaukolämpöverkon etäisyydestä riippuu suurelta osin se, tuleeko ylijäämälämmön siirtäminen verkoon kannattavaksi. Broberg et al. Ruotsissa suorittaman tutkimuksen mukaan ylijäämälämmön hinta määräytyisi avoimen kilpailun markkinoilla marginaalisen tuotantokustannuksen mukaan eli kalleimman tuotantoyksikön tuotantokustannuksen mukaan. (Broberg et al. 2012)

3.5 Termisen energian varastoinnin rooli

IEA:n julkaiseman uusiutuvan lämmön ja jäähdytyksen raportin mukaan termisen energian varastot ovat olennainen osa uusiutuvan energian käytön lisäämistä etenkin teollisen mittaluokan lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä, ja siksi ne on myös otettu tähän tarkasteluun mukaan. (IEA, 2014) Termisen energian varastoilla (*engl. TES, Thermal Energy Storage*) eli lämpö ja kylmävarastoilla voidaan myös pienentää huipputuotantokapasiteetin rakentamistarvetta, ja alentaa lämmöntuotantokustannuksia, kun ladataan varastoa lämmön tuotannon halvan rajakustannuksen aikana ja puretaan kalliin rajakustannuksen aikana. (Koskelainen et al. 2006)

Lämpövarastot voidaan luokitella kolmen eri teknologisen periaatteen mukaan, tuntuvan lämmön varastoihin, latentti eli faasinmuutoslämmönvarastoihin ja kemialliseen reaktioon perustuviin varastoihin. Tuntuvan lämmön varastointi on kypsää tekniikkaa ja ollut jo pitkään käytössä. Latenttilämmön ja kemiallisilla varastoilla on kuitenkin paljon suuremmat energianvarastointitiheydet kuin tuntuvan lämmön varastoilla, joten niillä voidaan huomattavasti pienentää varastointitilavuuksia ja lämpöhäviöitä. Nämä teknologiat ovat kuitenkin vielä tutkimus- ja kehitysasteella. (Xu et al. 2014)

Yleisin tuntuvan lämmön varastointiaineena käytetty aine on vesi, koska vedellä on hyvät lämmön varastointiominaisuudet, kuten suhteellisen korkea ominaislämpökapasiteetti $c_p = 4,19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. Tuntuvan lämmön varastoitu energiamäärä voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä. (Giancoli et al. 2005)

$$Q = mc_p \Delta T \quad (5)$$

Q on varastoitu lämpöenergiämäärä [kJ]

m on varastointiaineen massa [kg]

c_p on varastointiaineen keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]

ΔT on varastointiaineeseen muodostettu lämpötilaero [°C]

Latenttilämmön varastointi perustuu aineen faasinmuutoksessa vapautuvaan tai sitoutuvaan energiaan (*engl. PCM, phase change materials*). Varastointuneen energiamäärän laskemisessa voidaan käyttää seuraavaa yhtälöä. (Giancoli et al. 2005)

$$Q = mL \quad (6)$$

Q on varastoitu lämpöenergiämäärä [kJ]

m on varastointiaineen massa [kg]

L on aineen latenttilämpö faasimuutoksessa [kJ/kg]

Varastoinnissa on ensisijaista varastojen koon mitoittaminen optimaaliseksi tilantarpeen, kustannusten ja varastointikapasiteetin suhteen. Varastoa voidaan käyttää lyhytaikaiseen päivittäisvarastointiin tai sitten pitkäaikaisempaan kausivarastointiin. Suomeen rakennettujen lämpövarastojen tietoja on koottu taulukkoon 5. (Alanen et al. 2003)

Taulukko 5. Suomeen rakennettuja lämpövarastoja. (Alanen et al. 2003)

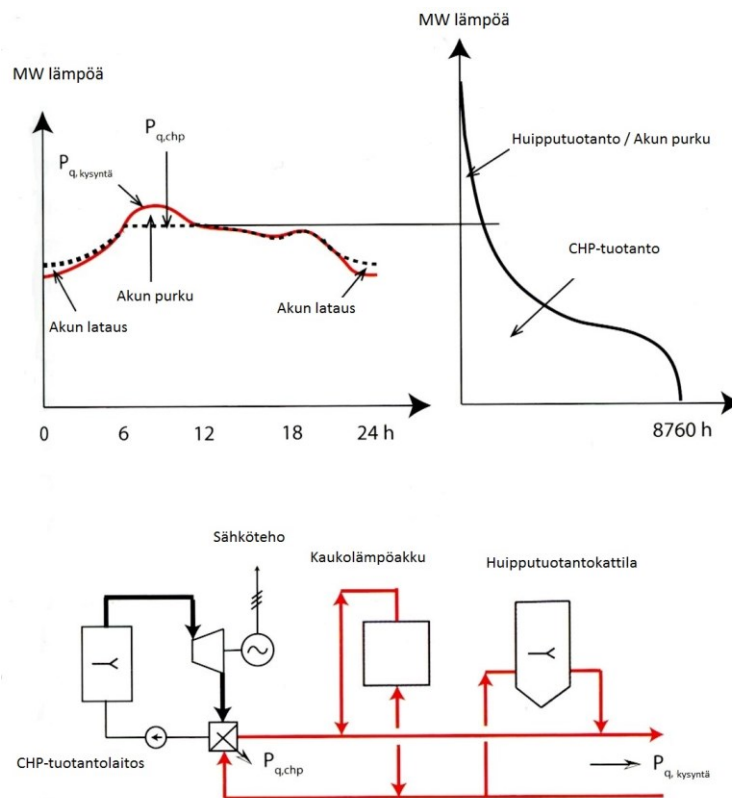
| Paikka | Tilavuus m³ | Kapasi- teetti MWh | Maksimi- teho MW | Pääpolttoaine | Käyt- töönot- tovuosi |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Otaniemi¹ | 500 | 20 | 10 | Kaasu | 1974 |
| Oulu | 15 000 | 800 | 80 | Turve | 1985 |
| Oulu (kal- lio) | 190 000 | 10 000 | 80 | Turve | 1996 |
| Lahti | 10 000 | 450 | 40 | Hiili | 1985 |
| Lahti | 200 | 9 | 1 | Kaasu | 1989 |
| Naantali | 15 000 | 690 | 82 | Hiili | 1985 |
| Helsinki Salmisaari² | 2*10 000 | 1 000 | 130 | Hiili | 1987 |
| Helsinki Vuosaari | 26 000 | 1 400 | 130 | Kaasu | 1997 |
| Saarijärvi¹ | 350 | 21 | 3 | Turve | 1988 |
| Kouvola | 10 000 | 420 | 72 | Kaasu | 1988 |
| Hämeen- linna² | 10 000 | 320 | 50 | Hiili | 1988 |
| Hyvinkää | 10 000 | 350 | 50 | Kaasu | 1988 |
| Vantaa³ | 20 000 | 900 | 50 | Hiili | 1990 |
| Rovaniemi | 10 000 | 450 | 30 | Turve | 1998 |
| Turku⁴ | | | | Hiili, biomassa | 2002 |

¹ paineistettu, ² kytkentä lämmönsiirtimellä, ³ muutettu vanhasta öljysäiliöstä, ⁴ muutettu vanhasta kaasukellosta

3.5.1 Lyhytaikaisvarastot

Lyhytaikaisvarastointi tarkoittaa lämmönvarastointia muutamista tunneista päiviin. Tyyppillisin käytetty lämpöakku on vesisäiliövarasto kaukolämpöverkossa, jossa lämmönsiirtoaineena on vesi. Kaukolämpöverkon omaa vesimassan varastointikapasiteettia voidaan myös käyttää pienissä määrin varaajana nostamalla väliaikaisesti kaukolämmön menoveden lämpötilaa, mutta tämä ei ole kuitenkaan yhtä joustavaa. Varastointisäiliönä käytetään yleensä paineistettua tai paineistamatonta terässäiliötä, tai toisinaan kallioluolaa. Näistä ilmakehän paineessa toimiva terässäiliön on yksinkertaisin ja edullisin, ja siksi eniten käytetty. (Frederiksen, Werner 2013)

Lyhytaikaisvarastossa termistä energiaa voidaan varastoida esimerkiksi päivän sisällä pienemmän kysynnän tunneilta huipputarpeen tuntien varalle. Lyhytaikaisvarastoja voidaan myös käyttää äkillisten tuotannon vaihteluiden tasaamiseen ja kuormahuippujen leikkaamiseen, jolloin tuotannon kokonaiskapasiteettitarvetta saadaan pienennettyä. Usein lyhytaikaiset lämpöakut mitoitetaan 24 tunnin syklille kuormahuippujen tasoittamiseen, jolloin voidaan välttää kalliimpien huipputuotantolaitosten käyttöä. Keskitälvellä, mikäli huippukuorman tarve on toistuvaa, ei voida kokonaan välttää huipputuotantolaitosten käynnistämistä. Lämpöakun käyttö huippukuormien tasaamisessa kuitenkin alentaa lämmöntuotannon kokonaiskustannuksia. Kuvassa 16. on esitetty kaukolämpöakun kytkentä ja käyttö kaukolämpöverkossa kuormien leikkaamiseen. (Frederiksen, Werner 2013)

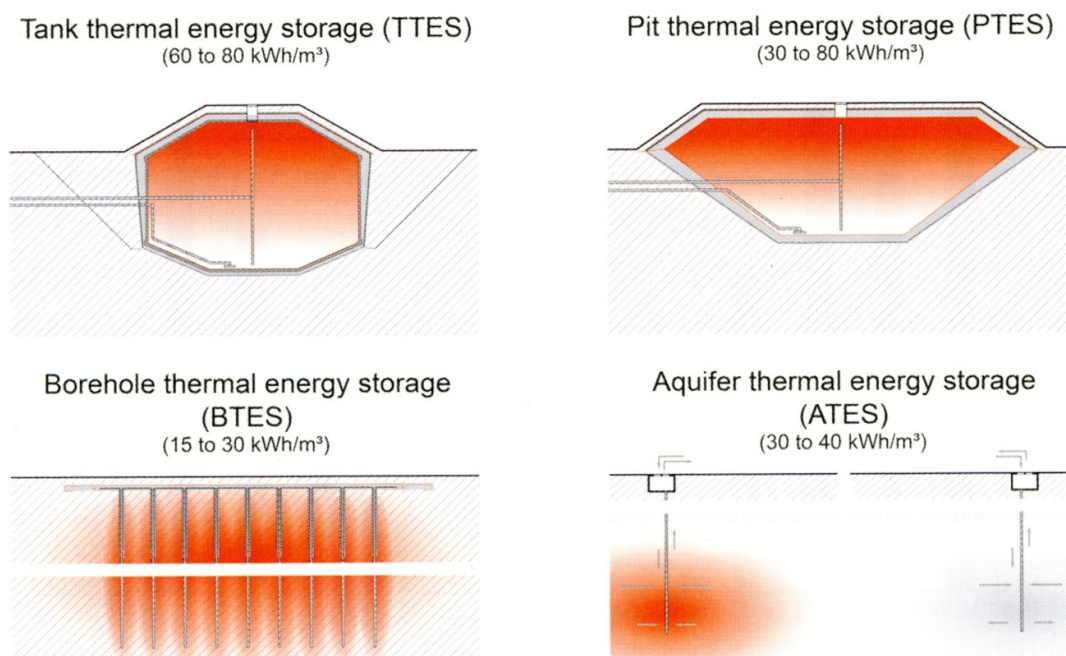


Kuva 16. Kaukolämpöakun käyttö kuormahuippujen leikkaamiseen. (Frederiksen, Werner 2013)

3.5.2 Kausivarastot

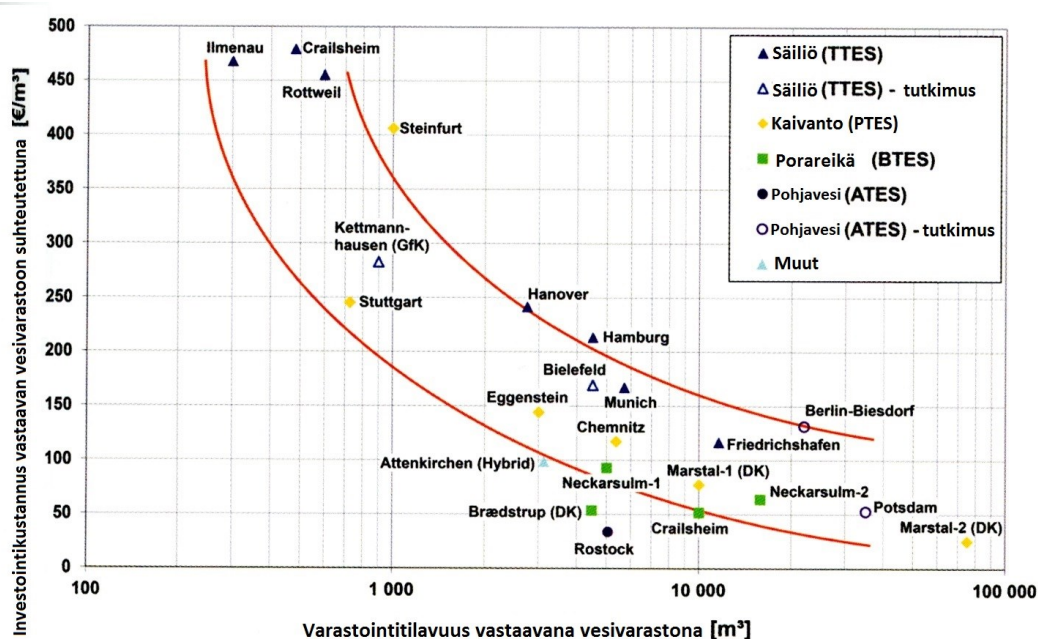
Pitkäaikaiset kausivarastointitekniikat viittaavat termisen energian varastointiin, joissa lämpöä voidaan varastoida viikkoja tai kuukausia lämmöntarpeen vuodenaikaisvaihtelun varalle. Potentiaaliset kemialliseen reaktioon ja faasinmuutokseen perustuvat teknologiat ovat kuitenkin vielä kehitystyön alla. (Frederiksen, Werner 2013) Kausivarastoinnin perustuessa tuntevan lämmön varastointiin suuret energiamäärät vaativat yleensä suuret maanalaiset varastot. Toisaalta niiden etuna ovat koon kasvaessa pienenevät lämpöhäviöt. Maanalaisia lämpövarastoja on useaa eri tyyppiä, joita ovat esimerkiksi kuumavesivarastot, jotka voivat olla rakennettu kaivantoihin, kallioluoliin tai suuriin osittain tai maanalaisiin säiliöihin. Lisäksi erilaisia varastointitekniikoita ovat soravesivarastot, porareikävarastot ja pohjavesivarastot. (Alanen et al. 2003)

Saksassa on rakennettu lukuisia demonstraatioita erilaisista lämmön kausivarastointitekniikoista, joiden rakennetta on esitetty kuvassa 17. Säiliövarastot (*engl. TTES, tank thermal energy storages*) ja kaivantovarastot (*engl. PTES, Pit thermal energy storages*) ovat kuumavesivarastoja, joissa vesi lämmitetään usein suoraan kaukolämmön menoveden lämpötilaan. Porareikävarastossa (*engl. BTES, Borehole thermal energy storages*) kierrätetään kuumaa vettä ladattaessa ja kylmää purettaessa. Pohjavesivarasto (*engl. ATES, Aquifer thermal energy storages*) puolestaan toimii osittain samalla periaatteella kuin geotermien lämpölaitos. Maaperään pumpataan vettä, jossa se liikkuu läpäisevän maakerroksen läpi. Nämä kaksi jälkimmäistä laitosta ovat eristämättömiä, mutta suuren koon avulla lämpöhäviöt voidaan pitää kohtuullisella tasolla. (Frederiksen, Werner 2013)



Kuva 17. Lämmön kausivarastoinnin demonstroituja tekniikoita. (Frederiksen, Werner 2013)

Tanskassa useat aurinkolämpölaitosten yhteyteen rakennetut suurimmat lämpövarastot ovat kaivantovarastoja. Esimerkiksi yhdessä suurimmista 13 MW aurinkolämpölaitok-
sista Marstalissa Tanskassa on kaksi pienempää ja yksi suuri 10 000 m³ kaivantovarasto. Kööpenhaminaan on suunnitteilla myös 300 000 m³ lämpövarasto vanhalle satama-alueelle. Ruotsissa on suunnitteilla myös useiden vanhojen öljynvarastointiin rakennettujen kallioluolien muuttaminen lämmön kausivarastointikäyttöön. Ruotsissa on myös tehty paljon tieteellistä tutkimusta lämmönsiirtymisen ilmiöistä maaperässä, ja tätä tutkimustietoa on hyödynnetty muun muassa Lyckebon kaupungissa sijaitsevan 100 000 m³ lämpövaraston suunnittelussa, joka on vuonna 1983 rakennetun 3 MW aurinkolämpölaitoksen yhteyteen. Saksassa tutkittujen kausivarastojen demonstraatioprojektien investointikustannuksia on esitetty kuvassa 18. (Frederiksen, Werner 2013)



Kuva 18. Investointikustannuksia lämmön kausivarastoinnin demonstraatioprojekteissa. (Frederiksen, Werner 2013)

Tutkimusten mukaan kausittaisten lämpövarastojen käytön odotetaan tulevaisuudessa lisääntyvän, sillä tyypillisesti huipputuotantolaitosten käyttö on ollut perustuotantolaitoksia selvästi kalliimpaa ja varastointitekniikoiden kehittyessä voi muodostua selkeä taloudellinen kannuste vähentää huippukapasiteetin käyttöä. Varastointiprojektien demonstraatioista saatuja kokemuksia voidaan hyödyntää varastojen koon kasvattamisessa aina koko kausittaisen kuorman vaihteluiden tasaamiseen asti. Lisäksi tulevaisuudessa odotetaan eri energiaverkkojen välisen energian vaihdon ja tasoittavan varastointikapasiteetin hyödyntämisen lisääntyvän. (Gadd, Werner 2015)

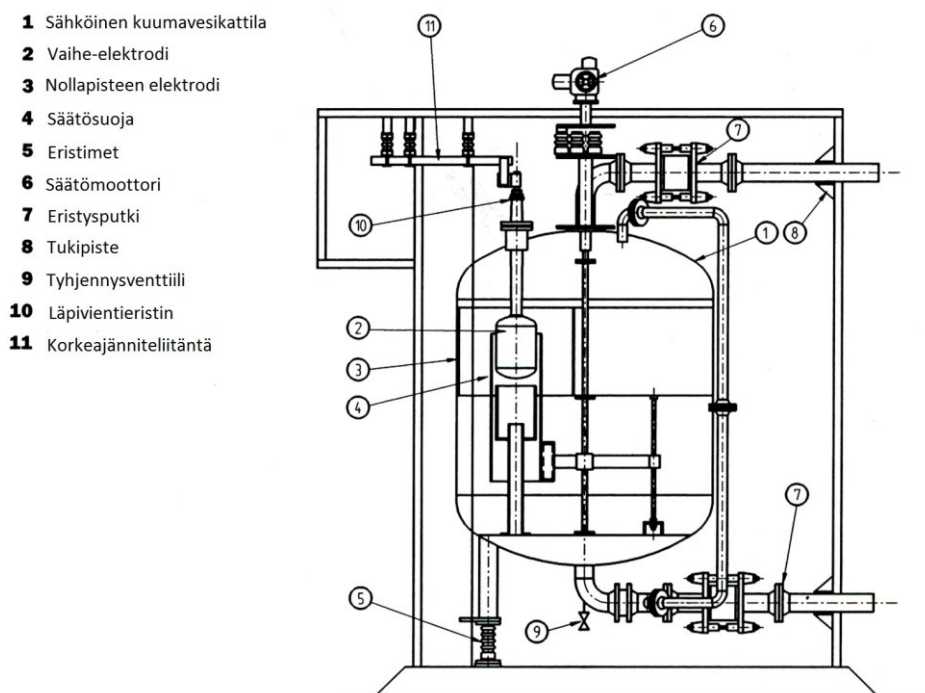
3.6 Muut termisen energian tuotantomuodot

Termisen energian tuotannossa voidaan käyttää myös monia muita lämmönlähteitä ja energiantuotantomuotoja, kuin mitä tässä on esitelty ja useita on kehitteillä. Muita uudempia teknologioita ovat esimerkiksi usein pien-CHP-tuotannon yhteydessä mainitut polttokennot ja Stirling-moottorit, jotka ovat kuitenkin vasta kehitteillä sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa ja pienemmän kokoluokan sovelluksissa. Seuraavassa tarkastellaan kuitenkin vielä sähkökattiloiden käyttöä uusiutuvalla sähköllä ja CCS-teknologian hyödyntämistä olemassa olevissa laitoksissa.

3.6.1 Sähkökattilat käyttäen hiilineutraalia sähköä

Sähkökattiloita on käytetty kaukolämmön tuotantokäytössä alueilla, joissa sähköä on satunnaisesti saatavilla matalaan hintaan. Esimerkiksi Norjassa ja Ruotsissa vesivoimatuotantoa on paljon asennettuna, ja joissain kaukolämpöjärjestelmissä on käytössä myös sähkökattiloita. Sähköntuotannon vaihteluita sähköverkkoon voidaan tasoittaa käyttämällä sähkökattiloita tai lämpöpumppuja ylimääräsähkön muuntamiseen lämmöksi. Tällä tavalla sähköverkossa voidaan hyödyntää myös suuremmassa määrin vaihtelevaa tuotantoa, kuten tuulivoimaa tai vesivoimaa. (Frederiksen, Werner 2013) Tässä tarkoituksessa käytettyä sähkökattilaa voidaan myös pitää sähkön varastointimenetelmänä lämpöenergiaksi, jonka varastointi on suhteellisesti helpompaa ja kustannustehokkaampaa. (engl. *Electricity-To-Thermal, E2T*).

Suuren sähkökattilan tyypillinen rakenne on esitetty kuvassa 19. Veden lämpötila nousee kattilassa, kun sähkövirta kulkee sen läpi. Sähkövirran suuruus on veden sähkönjohtavuuden ja elektrodien aktiivisen pinta-alan funktio, jota muuttamalla voidaan säätää tehoa minimissään 10–20% ja maksimissaan 100 % välillä. (Frederiksen, Werner 2013)



Kuva 19. Tyypillisen suuren sähkökattilan rakenne ja osat. (Frederiksen, Werner 2013)

Toisaalta uusiutuvan sähköntuotannon vaihtelevuuden johdosta sähkökattiloiden kannattavaa ajallista käyttöä ei voi siis kovin tarkkaan hallita lämmön kysynnän mukaan ja voidaan tarvita myös suurempia lämpövarastoja tuotannon ja kysynnän tasapainottamiseen. Kuitenkin esimerkiksi tuulivoimatuotanto on keskimäärin suurempaa talvella lämmityskauden aikana kuin kesäkaudella, ja myös tuulen voimakkuus korreloi osittain suoraan rakennusten lämmitystarpeeseen, koska ilmapuodot rakennusten läpi voimistuvat. Vähäisillä käyttötunneilla lähinnä huippu- ja varalämmöntuotannossa voi sähkökattilan käyttö olla kannattavaa, mikäli investointi on edullinen ja käyttökustannukset jäävät pieniksi vähäisten käyttötuntien takia. Sähkökattiloiden käyttövarmuus ja säädettävyyys ovat suhteellisen hyviä. Tuulivoimaloiden tuottama sähkö voitaisiin käyttää lämmön tuotannossa wind-to-heat-periaatteella, jossa sähkökattilat ja lämpöpumpit käyttäisivät tuuliturbiinin tuottamaa sähköä energialähteenään.

Toisaalta sähkökattiloiden käyttö huippukulutuskausina kasvattaa puolestaan sähköntuotannon huipputehon tarvetta. Tarkastellessa tilannetta kokonaisuudessaan huippukulutuskausina, vaikka sähkökattiloita käyttämällä voitaisiinkin lämpöä tuottaa tällöinkin uusiutuvasta sähköstä hiilineutraalisti, lisääntyy tällöin sähkön huippukulutustarve. Sähkön tuotantoa täytyy tällöin lisätä huipputuotantolaitoksilla, jolloin pelkän sähkön huipputuotannon hyötysuhteiden ollessa alhaisemmat kuin pelkän lämmöntuotannossa voi energijärjestelmän kokonaisenergiatehokkuus kärsiä. Näin ollen ilman suurempia varastointimenetelmiä sähkökattiloiden käyttö lämmön huipputuotannossa siirtää vain polttoaineiden käyttämisen tarvetta helposti vähemmän energiatehokkaan sähkön tuotannon puolelle, mikäli uusiutuvan sähkön jousto- ja varakapasiteetti ei ole riittävä.

3.6.2 CCS-teknologian hyödyntäminen

CCS-teknologia (*engl. Carbon Capture and Storage*) eli hiilidioksidin talteenotto ja varastointi on ollut jo pitkään jatkuvan tutkimus- ja kehitystyön alla. CCS-teknologian avulla käytössä oleva fossiilinen tuotanto voidaan muuttaa hiilineutraaliksi. Jos CCS-teknologia yhdistetään biopolttoaineisiin, teknologian käyttö periaatteessa vähentää hiilidioksidin määrää kokonaisuudessaan ilmakehässä, siitä syystä että biopolttoaineeseen kasvun aikana sitoutunut hiilidioksidi ei pääse vapautumaan takaisin ilmakehään. (Kärki et al. 2013)

Hiilidioksidin talteenottoon ja varastointiin on kehitteillä useita erilaisia menetelmiä, jotka perustuvat pääosin kolmeen erilaiseen lähestymistapaan. Näitä ovat prosessin muuntelu niin että kaasujen erottelu tapahtuu ennen polttoa eli talteenotto polttoaineesta, hiilidioksidin erottelu polton jälkeen savukaasuista tai suoraan polton aikainen talteenotto, esimerkiksi happipolttu. (Rackley 2010) Olemassa oleviin laitoksiin jälkikäteen asennettavaksi soveltuvat etenkin polton jälkeiseen talteenottoon perustuvat järjestelmät. (Rubin et al. 2015) Suomessa ei ole luonnostaan hiilidioksidin varastointiin sopivia maa-peräesiintymiä, joten talteen otettu hiilidioksidi kuljetettaisiin todennäköisimmin laivoilla muualle varastoitavaksi. Kuljetusta varten hiilidioksidi tulee paineistaa ja jäähdyttää noin 6,5 bar paineeseen ja -52 °C lämpötilaan. (Kärki et al. 2013)

CCS-teknologiaa on pitkään pidetty tärkeänä osana hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä, mutta sen käyttöä rajoittavina esteinä ovat pysyneet nykyisten järjestelmien korkeat kustannukset. Viimeisten 10 vuoden aikana tapahtunut maailmanlaajuinen yleinen materiaali ja laitteistokustannusten nousu on myös pikemminkin nostanut kuin laskenut CCS-teknologian kustannuksia. Lisäksi kustannukset CCS-teknologian liittämisestä olemassa oleviin laitoksiin ovat tyypillisesti arvioitu suuremmiksi kuin uusien CCS-teknologiaa hyödyntävien laitosten rakentaminen. Tähän syynä on esimerkiksi se, että olemassa olevan laitoksen jäljellä oleva käyttöikä saattaa rajoittaa myös CCS-laitoksen käyttöikää, eikä optimoinnin mahdollisuuksia ole vastaavasti kuin uusissa laitoksissa, joten hyötysuhteetkin jäävät pienemmäksi. Lisäksi CO₂-talteenottolaitos vaatii suhteellisen paljon tilaa, jota olemassa olevien laitosten vieressä ei aina ole ylimäärin. Suurempien laitosten yhteydessä hyöty yksikkökustannusten pienenemisestä tuotantomäärien kasvaessa korostuu, kun taas pienemmillä laitoksilla yksikkökustannukset ovat suhteessa suurempia. (Rubin et al. 2015)

3.7 Referenssikohteita maailmalta

Tässä osiossa on esitelty muutamia kaupunkeja maailmalta, joissa on toteutettu tai suunnitellaan toteutettavan uusiutuvien energianlähteiden käyttöä kaukolämmössä, joko osittain tai koko järjestelmän muuttamista uusiutuvaksi. Ensimmäisenä on Kööpenhamina, jonka tavoite on olla ensimmäinen pääkaupunki, jonka kaukolämpöjärjestelmä perustuu kokonaan uusiutuviin jo vuonna 2025.

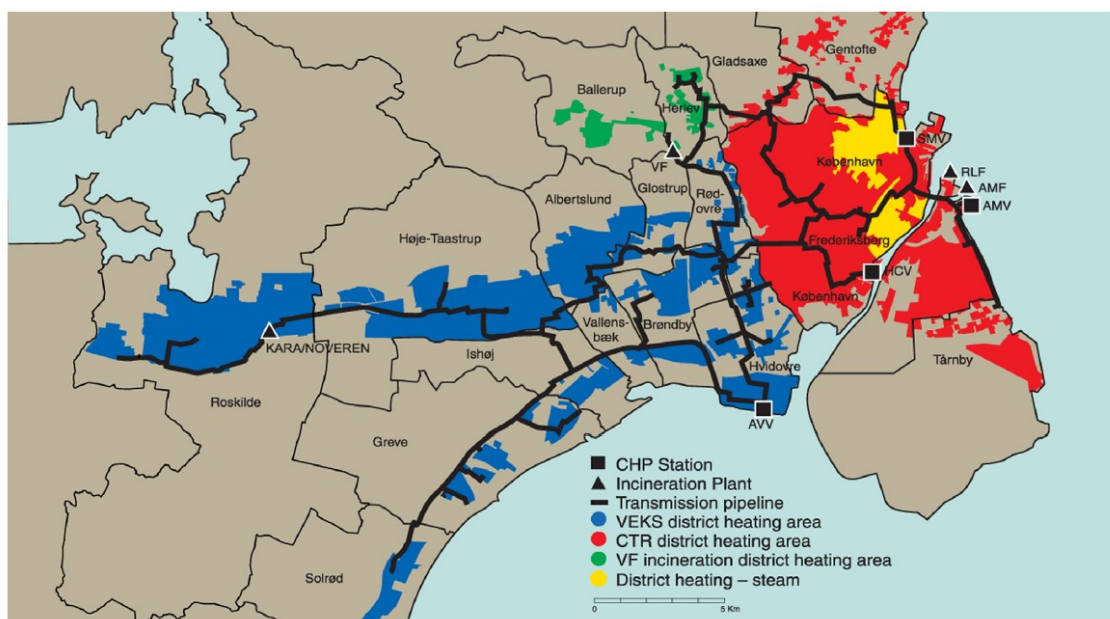
3.7.1 Kööpenhamina, Tanska

Tanskassa hallitus on linjannut, että Tanskan energiajärjestelmä on kokonaisuudessaan vapaa fossiilisista polttoaineista vuoteen 2050 mennessä ja 2035 mennessä energiantuotanto rakennuksiin ja sähköksi tulisi perustua kokonaan uusiutuviin energianlähteisiin. (Danish Ministry of Climate and Energy 2011) Saavuttaakseen tämän tavoitteen tulla riippumattomaksi fossiilisista polttoaineista Tanskassa tähdätään olemassa olevan rakennuskannan energiankulutuksen vähentämiseen, energiatehokkuuden parantamiseen, ja nykyisen lämmöntuotannon polttoaineiden vaihtamiseen fossiilisista uusiutuviin energianlähteisiin. Kaukolämpö käsitetään kestäväenä tapana hankkia rakennusten tilojen ja käyttöveden lämmitykseen tarvittava lämpöenergia tiheästi asutuilla alueilla. (Danish Ministry of Climate and Energy 2011)

Kööpenhaminassa tavoitteena on olla ensimmäinen pääkaupunki, jonka kaukolämpöjärjestelmä perustuu kokonaan uusiutuviin jo vuoteen 2025 mennessä, kun muu maa seuraa perässä tavoitteenaan vuosi 2035. Kööpenhaminassa yli 98 % rakennuksista lämpenee nykyään kaukolämmöllä, kun kaukolämpöön liittyminen määrättiin pakolliseksi 1992. Harrestrup ja Svendsen tutkivat Kööpenhaminan kaukolämpöjärjestelmän alueella, miten lämpöenergian säästöt liittyvät lämmön tuottotarpeeseen taloudellisesta näkökulmasta. (Harrestrup, Svendsen 2014) Tutkimuksessa todettiin, että nykyiselle rakennuskannalle

sovellettavissa pitkän tähtäimen strategioissa täytyy varmistaa, että kustannukset minimoidaan ja investoinnit energiansäästötoimenpiteisiin ja uuteen lämmityskapasiteettiin optimoidaan ja toteutetaan oikeaan aikaan.

Kööpenhaminan nykyisessä kaukolämpöverkossa on kolme jätteenpolttolaitosta ja neljä CHP-laitosta jakeluverkossa. Kaupunkialueen lämpöverkon ja laitosten sijoittumien näkyy kuvassa 20. Alueella on myös neljä lämmönjakeluyritystä, VEKS, CTR, Vestforbrændingen ja HOFOR, joiden toiminta-alueet on merkitty kuvaan 20 eri väreillä. Koko alueen lämmöntuotanto on 35 PJ/a eli noin 9720 GWh/a huippukuorman ollessa 2500 MW. Verkon lämpöhäviöiden oletetaan olevan 15 % perinteisessä järjestelmässä ja 8 % matalan lämpötilan järjestelmässä. Lämpimän käyttöveden tarpeeksi on arvioitu noin 400 MW lähes tasaisesti ympäri vuoden pois lukien kesälomakauden, jolloin kuluttajien oletetaan käyttävän vähemmän lomien takia. Kaukolämpöön yksittäisistä maakaasulämmitysjärjestelmistä siirtyvien kuluttajien potentiaalin arvioidaan olevan noin 10 PJ, mikä kasvattaisi kokonaisuudessaan lämmöntarpeen 45 PJ/a eli 12500 GWh/a ja huippukuorma 3200 MW. (Harrestrup, Svendsen 2014) Rakennuskannan uusiutumismuutos on oletettu olevan 1 % vuodessa. (Barras 2009)



Kuva 20. Kööpenhaminan alueen kaukolämpöverkko. (Harrestrup, Svendsen 2014)

Harrestrup ja Svendsen totesivat tutkimuksessaan, että kaikissa eri rakennuskannan uudistusnopeus ja energiaremontoinnin skenaarioissa Kööpenhaminan kaukolämmön tuotannon muuntamisessa hiilineutraaliksi investointien pääpaino kohdistuu geotermiseen energiaan, jonka takia sen kehittäminen on kannattavaa aloittaa mahdollisimman pian. Huippukuorman tuotantoon geotermisen energian käyttäminen arviointiin kuitenkin investointikustannuksiltaan liian korkeaksi, jolloin energiavarastoja tai biomassaa käytettäisiin huippukuorman tuotannon kattamiseen. (Harrestrup, Svendsen 2014)

Kööpenhaminan kaukolämpöjärjestelmässä on käytetty polttoaineina 34 % biomassaa, 22 % hiiltä, 20 % maakaasua, 11 % uusiutuvaa jätettä, 7 % uusiutumattomaa jätettä, 5 % öljyä

ja 1 % geotermistä energiaa. Suunnitteilla on siirtyminen hiiltä käyttävissä laitoksissa kokonaan biomassaan ja lisäksi rakentaa uutta kapasiteettia, johon kuuluu meri- ja jätevesilämpöpumppuja, geoterminen lämpölaitos, aurinkolämpölaitos, lämmönvarastointia ja sähkökattila. Lisäksi energiankäyttöä tehostetaan muun muassa muuttamalla kaikki höyryputkijärjestelmät vesikaukolämpöön ja optimoimalla lämpötilat kaukolämpöjärjestelmässä ja ottamalla käyttöön erityisiä matalan lämpötilan kaukolämpöalueita. Biomassaan ja jätteeseen pohjautuvan CHP-tuotannon suunnitellaan pysyvän avainasemassa Kööpenhaminan kaukolämmön tuotannossa, mutta lisäksi pidetään tärkeänä tuotannon monipuolistumista, jotta se ei olisi liian riippuvainen biomassasta, mikäli biomassan käyttö jostain syystä rajoittuu. Tämän takia tuotantojärjestelmän monipuolisuutta pyritään kasvattamaan sisällyttämällä siihen myös lämpöpumppuja, geotermistä energiaa ja aurinkolämpöä. Toisaalta paikalliset lämpöpumppujen potentiaalitkin ovat rajalliset. Vuoden 2035 tavoitteeseen pääsyyn on laadittu kolme erilaista vaihtoehtoa, jotka on esitetty taulukossa 6. (Hedegaard 2014)

Taulukko 6. Kööpenhaminan kolme vaihtoehtoista suuntaa hiilineutraalin kaukolämmön tuotannossa vuoteen 2035. (Hedegaard 2014)

| MW-lämpöä | Referenssi | Vaihtoehto 1 | Vaihtoehto 2 |
|--------------------------------------|------------|---|--|
| Lämpöpumput ja geoterminen | 18 MW | 300 MW Lämpöpumppuja: 145 MW teollisuuden ylijäämälämpöä ja lämpöä jätevesistä Geotermistä: 75 MW | 600 MW Lämpöpumppuja: 145 MW teollisuuden ylijäämälämpöä ja lämpöä jätevesistä Geotermistä: 305 MW |
| Aurinkolämpö | | 0,5 PJ | 1 PJ |
| Biomassa- & jäte- CHP | ≈2065 MW | ≈1730 MW | ≈1480 MW |

3.7.2 Skotlanti, Iso-Britannia

Skotlannissa hallituksen toimesta julkaistiin strategia kaupallisesti kilpailukykyisen monimuotoisen uusiutuvan lämmöntuotannon lisäämiseksi jo vuonna 2008, koska sillä katsottiin olevan myönteinen vaikutus sekä ilmastonmuutoksen hillitsemisessä että kestäväen taloudellisen kasvun luomisessa. (The Scottish Government 2008) Skotlannin vuosittaisen lämpöenergiankulutuksen arvioitiin tuolloin olevan noin 91 TWh/a, joka vastasi noin 57 % kaikesta energiankulutuksesta Skotlannissa liikenteen osuuden ollessa noin 28 % ja sähköenergian noin 15 % kaikesta energiankulutuksesta. Lämpöenergian jakautuminen eri kulutuskohteisiin on esitetty taulukossa 7. (The Scottish Government 2008)

Taulukko 7. Arvioitu vuosittainen lämpöenergian kulutus Skotlannissa (The Scottish Government 2008)

| | Koko- naisener- gianku- lutus (TWh/a) | Arvioitu tilalämmi- tysener- gian tarve (TWh/a) | Arvioitu te- ollisuuspro- sessien läm- pöenergian tarve (TWh/a) | Arvioitu käyttöve- den lämpö- energian tarve (TWh/a) | Arvioitu kokonais- lämpö- energian tarve (TWh/a) | Lämmön- tuotantoon käytetty sähkö (TWh/a) |
|---------------------------------------|--|--|--|---|---|--|
| Kotita- loudet | 56 | 36 | | 11 | 47 | 5 |
| Teolli- suus | 35 | 4 | 23 | 2 | 27 | 2 |
| Palvelut ja julki- nen | 27 | 15 | | 2 | 17 | 4 |
| Yh- teensä | 118 | | | | 91 | |

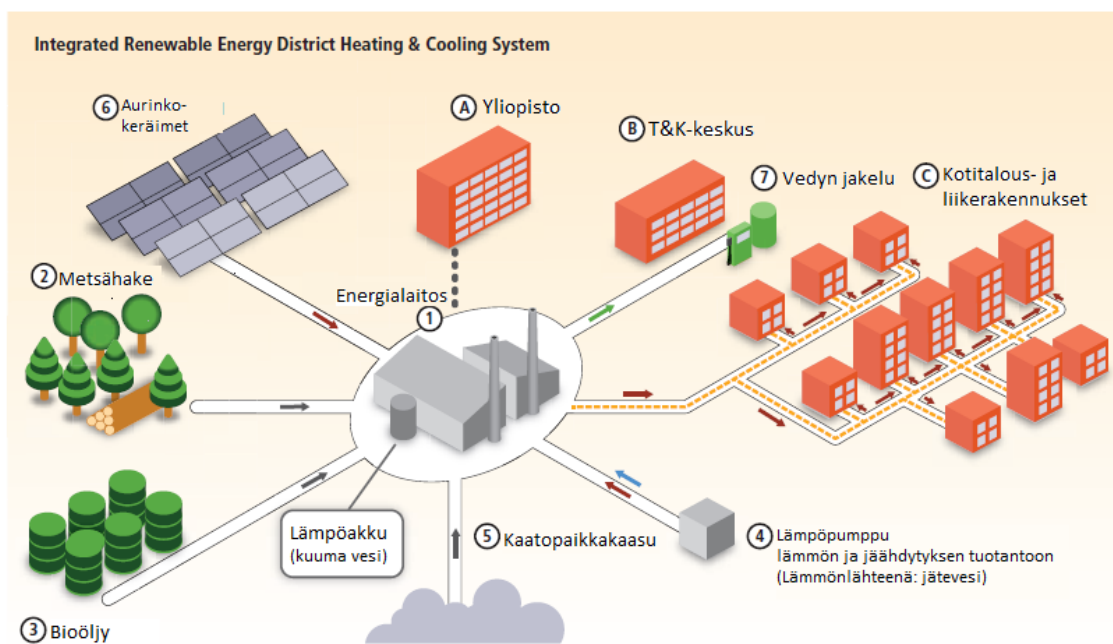
Tässä strategiassa mainittuja pääasiallisia lämmöntuotantoteknologioita ovat biomassan poltto, lämpöpumput, aurinkolämpö, geoterminen energia (aquifers), uusiutuva energia biomassapohjaisesta jätteestä käyttäen energianmuuntomenetelmiä, kuten anaerobinen käyminen, kaasutus ja poltto, sekä kaatopaikkakaasun kerääminen ja poltto sekä wind-to-heat (tuulienergialla lämmöntuotanto sähkön kautta tai kitkalla). Näiden uusiutuvien energialähteiden lisäämisessä tärkeänä keinona pidettiin kaukolämpöverkon rakentamista joustavan energianjakeluinfrastruktuurin kehittämiseksi sekä kestävien lämmitysmarkkinoiden ja oikeanlaisten tukijärjestelmien ja kannustinpolitiikan luomista. (The Scottish Government 2008)

Viimeaikainen julkaisu Skotlannin hallitukselta (2015) jatkoi samaa linjaa hiilineutraaliin lämmöntuotantoon pyrkimiseksi. Lämmöntuotanto vastaa nykyisellään 55 % kaikesta Skotlannin energiankulutuksesta ja tuottaa 47 % kaikista päästöistä. Tavoitteena oleva 11 % uusiutuvan osuus lämmöntuotannossa 2020 mennessä on vielä kaukana, sillä vuonna 2012 uusiutuvien osuus vastasi vain 3 % lämmöntuotannosta. Päivitetyssä tavoitteessa on kuitenkin tunnistettu tarve lisätä kaukolämpöä, biomassaa, geotermistä energiaa, aurinkolämpöä ja lämpöpumppuja uusiutuvan energia tavoitteen saavuttamiseksi lämmöntuotannossa. (The Scottish Government, 2015)

3.7.3 Akershus, Norja

Norjassa Akershusin Lillestrømissä sijaitsee yksi Euroopan moderneimmista uusiutuvaan energiaan perustuvista kaukolämpökeskittymistä. Järjestelmällä tuotetaan 150 GWh kaukolämpöä vuodessa hiilidioksidineutraalisti. Säästö hiilidioksidipäästöissä on 30 000 tonnia vuodessa. Järjestelmän keskiössä on valtava 1,2 miljoonan litran lämminvesiakkku. Lämmönlähteinä käytetään metsähaketta, kaatopaikkakaasua läheiseltä kaatopaikalta sekä huipputuotannossa bioöljykattiloita. Lisäksi järjestelmään on rakennettu suuri aurinkolämpölaitos, jonka pinta-ala on 12 810 m². Aurinkolämpölaitos on Norjan suurin ja otettiin käyttöön marraskuussa 2012. Aurinkolämpölaitos koostuu 915 aurinkokeräimestä, jotka tuottavat arviolta 4,2 GWh vuosittain.

Edellä mainittujen lisäksi järjestelmään on kytketty lämpöpumppulaitos, joka käyttää lämmönlähteenään kolmen ympäröivän kunnan jätevesiä. Osa kaatopaikan tuottamasta metaanikaasusta käytetään vedyn tuottamiseen osana energian varastointitutkimusta. Järjestelmä on toteutettu yhteistyössä Akershus Energin, kaupallisten toimijoiden sekä paikallisen tutkimus- ja koulutuslaitosten kanssa. Akershus Energin investoinnin suuruus on noin 500 miljoonaa Norjan kruunua eli noin 54 miljoonaa euroa. Akershusin kaukolämpöjärjestelmän periaate on esitetty kuvassa 21. (Edenhofer et al. 2011)



Kuva 21. Akershusin uusiutuvan energian kaukolämpöjärjestelmä. (Edenhofer et al. 2011)

4 Soveltuvuus kaupunkiympäristön kaukolämmön erillistuotantoon

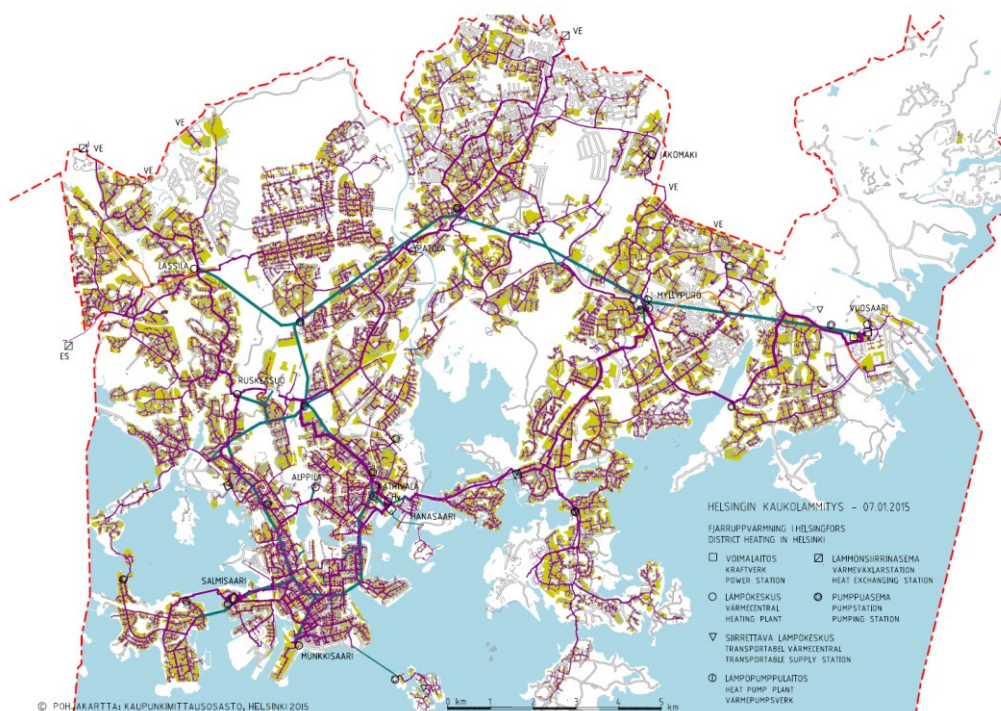
Tässä luvussa esitellään referenssikaupunkiympäristö ja lähtötilanne, jonka perusteella teknologioiden soveltuvuutta arvioidaan. Lisäksi esitellään käytetty aineisto, oletukset ja tutkimusmenetelmät. Ensin kuvataan tarkasteltavan kaupunkiympäristön kaukolämpöjärjestelmässä käytetyt lähtötiedot erillistuotantodata mukaan lukien, jotta voidaan tutkia soveltuvuutta juuri tässä kyseisessä ympäristössä. Tämän jälkeen esitellään tässä tutkimuksessa käytetyt laskentamenetelmät sekä systemaattiset analyysimenetelmät.

4.1 Lähtötiedot

Koska kaukolämmön tuotannossa on aina kyse alueellisesta paikallisenergiasta, teknologioiden soveltuvuuteen vaikuttavat suuresti paikallisen kaupungin ilmastolliset ja maantieteelliset olosuhteet sekä kaupunkirakenne. Tutkittavaksi kaupungiksi on tässä työssä valittu Helsinki. Tässä osiossa esitellään tapauskaupungin nykyisen kaukolämpöjärjestelmän ja kaupungin puitteet, jossa soveltuvuutta tutkitaan.

4.1.1 Tarkastelu ympäristön kuvaus

Tutkimuksen tarkastelu ympäristönä on siis Suomen mittakaavassa suuren kaupungin ympäristö. Erillistuotannon osuudeksi on määritetty tutkimuksen lähtötilanteessa 10 % vuosittaisesta kaukolämpöenergiasta ja muu osa tuotetaan yhteistuotannolla (90 %). Helsingissä kaukolämmön tuotanto on tyypillisenä vuonna keskimäärin luokkaa 7000 GWh ja esimerkiksi vuonna 2014 noin 6900 GWh. Näin ollen vuosittain tuotettu energiamäärä erillislämmöntuotannossa on noin 700 GWh. Helsingin kaupungin alueen kaukolämpökartta on esitetty kuvassa X. (Helen Oy 2015)



Kuva 22. Helsingin kaukolämpökartta. (Helen Oy 2015)

Erillislämmöntuotantolaitoksia on Helsingissä 11 kpl, joista 4 toimii maakaasulla, yksi kivihiilellä, yksi on lämpöpumppulaitos ja loput käyttävät raskasta tai kevyttä polttoöljyä tai näiden sekoitusta. Näiden erillislämpölaitosten yhteenlaskettu kapasiteetti on noin 2300 MW. Yhteistuotantolaitoksia on Helsingissä neljä kappaletta. Helsingissä olevien kaukolämmön tuotantolaitosten tunnuslukuja on esitetty taulukossa 8. (Energiateollisuus ry 2014) Helsingin kaukolämmön kaikessa tuotannossa käytettiin polttoaineina pääosin kivihiiltä (45 %) ja maakaasua (48 %), jotka ovat yhteistuotannossa käytettyjä polttoaineita. Lisäksi 5 % kaukolämmöstä tuotettiin lämpöpumpuilla ja 2 % öljyllä. Myös uusiutuvaa lämpöä tuotettiin pellettien seospoltolla 90 500 MWh. (Helen Oy 2015)

Taulukko 8. Helsingin kaukolämmön tuotantolaitokset 2013. Taulukon tietojen lähde: (Energiateollisuus ry 2014)

| Kaukolämpölaitokset | Käyttöönottovuosi | Kattiloiden lkm. | Kaukolämpöteho yht. [MW] | Pääpolttoaine |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Alppila | 1964 | 4 | 164 | kpö |
| Munkkisaari | 1969 | 5 | 235 | rpö |
| Ruskeasuo | 1972 | 4 | 280 | rpö |
| Lassila | 1977 | 4 | 334 | maka |
| Patola | 1982 | 6 | 240 | maka |
| Salmisaari | 1978 | 3 | 120 | rpö |
| Salmisaari | 1986 | 1 | 180 | kihi |
| Salmisaari | 1977 | 1 | 8 | rpö |
| Jakomäki | 1968 | 2 | 56 | rpö |
| Myllypuro | 1978 | 2 | 240 | maka |
| Vuosaari | 1989 | 3 | 120 | maka |
| Hanasaari | 1977 | 1 | 56 | rpö |
| Hanasaari | 2009 | 6 | 282 | rpö |
| Katri Vala | 2006 | | 90 | muu |
| Salmisaari B | 1984 | 1 | 300 | kihi |
| Hanasaari B | 1973 | 2 | 420 | kihi |
| Vuosaari A | 1991 | 2 | 160 | maka |
| Vuosaari B | 1998 | 2 | 420 | maka |

Edellä mainittujen lisäksi Helsingissä on pilottikohteena kaukolämpöverkon ulkopuolella toimiva Sakarinmäen koulukeskus, jossa tutkitaan lämmön tuotantoa aurinkolämmöllä, maalämmöllä ja bioöljyllä. Katri Valan lämpöpumppulaitos sijaitsee Katri Valan puiston alla Helsingissä kallioon louhittuna. Laitos tuottaa kaukolämpöä 90 MW ja kaukojäähdytystä 60 MW teholla. Lämmönlähteenä käytetään kaukojäähdytysverkon paluuvettä sekä puhdistettua jätevettä. (Helen Oy 2015)

4.2 Käytetyt menetelmät

Seuraavassa kuvataan käytettyjä laskenta- ja tutkimusmenetelmiä pääperiaatteittain. Ensin esitellään monikriteerianalyysin periaatteita, jonka avulla eri lämmöntuotantoratkaisuja voidaan vertailla, kun vertailussa halutaan ottaa huomioon useita eri kriteereitä. Tämän jälkeen esitellään taloudellisessa tarkastelussa käytetyt menetelmät.

4.2.1 Monikriteerianalyysi

Monikriteerianalyysin eli MCDA-analyysin (*engl. Multi-Criteria Decision Analysis*) käyttö kestävien energiapäätösten tekemisessä on yleistynyt, sillä se tarjoaa mahdollisuuden verrata useita vaihtoehtoja osittain vastakkaisillakin kriteereillä. Usein tavoitteet kestävästä kehityksestä ovat luonteeltaan moniulotteisia ja energiasysteemit kompleksisia. MCDA-analyysin eri vaiheisiin kuuluvat vaihtoehtojen ja kriteerien valinta, kriteerien painotus, arviointi ja vaihtoehtojen lopullinen ryhmittäminen vertailun mukaiseen järjestykseen. (Wang et al. 2009)

Kriteerit energiantuotantojärjestelmille kootaan yleensä teknisistä, taloudellisista, ympäristöllisistä ja sosiaalisista näkökulmista. Tyypillisiä energiantuotantomuotojen arvioinnissa käytettyjä teknisiä kriteereitä ovat hyötysuhde, eksergiahyötysuhde, primäärienergiasuhte, luotettavuus, kypsyys, kapasiteettikerroin, polttoaineen saatavuus, valmius vastata huipputehon tarpeeseen ja turvallisuus, joka sisältää laadun, saatavuuden ja huollettavuuden. Tyypillisiä taloudellisia kriteereitä ovat investointikustannus, käyttö- ja huoltokustannukset, polttoaineen kustannus, sähkön kustannus, nettonykyarvo (NPV), takaisinmaksuaika, käyttöikä, ekvivalentti vuosittainen kustannus. Ympäristönäkökulmasta tyypillisiä kriteereitä ovat NO_x-päästöt, CO₂-päästöt, CO-päästöt, SO₂-päästöt, hiukkaspäästöt, maankäyttö ja melu. Sosiaalisesta näkökulmasta kriteereitä ovat tyypillisesti sosiaalinen hyväksyttävyys, työpaikkojen luonti ja sosiaaliset hyödyt. (Wang et al. 2009)

Kriteerien painotusmenetodit voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: subjektiiviset, objektiiviset ja yhdistetyt painotusmenetodit. Energiapäätösten yhteydessä käytetään useita eri metodeja, jotka perustuvat painotettuun summaan, prioriteettien määrittämiseen, poissulkemiseen, sumean joukon metodiikkaan (*engl. fuzzy set methodology*) ja näiden yhdistelmiin. On huomattu, että investointikustannukset ovat yleensä ensisijalla kaikilla arviointikriteereillä ja CO₂-päästöt seuraavat lähellä perässä globaalin ympäristönsuojelun kasvavan fokuksen takia. Yhtäläinen kriteerien painotus on edelleen suosituin painotusmenetodi, ja analyttinen hierarkiaproessi (AHP) on suosituin kokonaisvaltainen MDCA-metodi. Ryhmittelymenetelmät ovat hyödyllisiä rationaalisen tuloksen saamisessa. (Wang et al. 2009)

Yleensä MCDA-ongelmaan liittyen kestäviin energiaratkaisuihin kuuluu m vaihtoehtoa, joita arvioidaan n kriteerillä. Ryhmitelty matriisi voidaan esittää muodossa (Wang et al. 2009)

$$\begin{array}{c}
\text{vaihtoehdot} \\
\begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{array}
\end{array}
\begin{array}{c}
\text{kriteerit} \\
\text{painokertoimet}
\end{array}
\begin{array}{c}
C_1 \quad C_2 \quad \cdots \quad C_n \\
w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_n
\end{array}
\begin{array}{c}
\left(\begin{array}{cccc} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{array} \right)_{m \times n}
\end{array}
\quad (7)$$

missä x_{ij} on i :nnen vaihtoehdon j :nnen kriteerin suoritusarvo, w_j on kriteerin j painokerroin, n on kriteerien lukumäärä ja m on vaihtoehtojen lukumäärä. (Wang et al. 2009)

Stokastinen monikriteerien arvostusanalyysi (SMAA)

SMAA-metodi eli stokastinen monikriteerinen arvostusanalyysi (*engl. Stochastic multicriteria acceptability analysis*) on monikriteerimenetelmä, jossa analysoidaan millaisilla painoarvojen arvon määrittäyksillä eri vaihtoehtoista tulee preferoituja. Siinä voidaan käyttää myös epätarkkaa ja epävarmaa dataa, eikä päätöksentekijöiden preferenssejä tarvitse määritellä implisiittisesti tai eksplisiittisesti, sillä menetelmä käy läpi erilaiset preferenssijakaumat. (Lahdelma et al. 1998, Lahdelma, Salminen 2001) SMAA-metodin käyttö on valittu tässä tutkimuksessa juuri edellä mainittujen syiden takia.

SMAA-analyysin tekeminen vaatii moniulotteisten integraalien arviointia, jotka käytännössä lasketaan numeerisesti. Laskennat voidaan suorittaa tehokkaasti Monte Carlo -simulointia käyttäen. (Tervonen, Lahdelma 2007) Tässä työssä Monte Carlo -simulointikierroksia laskettiin yli 10 000 kappaletta Excel-taulukkolaskentaohjelmaa sekä Aalto-yliopiston energiatekniikan laitoksen professori Lahdelman tutkimusryhmän SMAA-analyysiohjelmaa käyttäen.

SMAA-analyysin päätulokset ovat sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit b_i^r (*rank acceptability indices*), keskeiset painotusvektorit w_i^c (*central weight vectors*) ja luottamuskertoimet (*confidence factors*) eri vaihtoehdoille. Sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit kuvaavat eri preferenssien osuutta, jotka johtavat samaan sijalukuun kyseiselle vaihtoehdolle. Keskeiset painotusvektorit kuvaavat eri vaihtoehtoja puoltavia tyypillisiä preferenssejä, ja luottamuskertoimet mittaavat, ovatko kriteerien mittaukset riittävän tarkkoja informoituihin johtopäätösten tekoon. (Tervonen, Lahdelma 2007)

Ensimmäinen näistä SMAA-analyysin keskeisten tulosten arviointiin mittareista on arvoasteen hyväksyttävyyssindeksit b_i^r , jotka mittaavat erilaisten preferenssien määrää, jotka antavat vaihtoehdolle x_i sijoituksen r . Se on kaikkien niiden painotusjakaumien osuus, jotka tekevät vaihtoehdosta hyväksyttävän tietylle sijaluvulle, ja se ilmaistaan selkeimmin prosenttilukuina. Sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit voidaan laskea numeerisesti moniulotteisella integraalilla kriteerijakaumien ja suotuisien painokertoimien yli yhtälöllä (Tervonen, Lahdelma 2007)

$$b_i^r = \int_{\xi \in X} f_X(\xi) \int_{w \in W_i^r(\xi)} f_W(w) dw d\xi \quad (8)$$

Keskeiset painotusvektorit puolestaan kuvaavat millaiset kriteerien painotusjakaumat suosivat juuri kyseistä vaihtoehtoa. Keskeinen painotusvektori voidaan laskea numeerisesti moniulotteisena integraalina kriteerijakaumien ja ensimmäistä sijoitusta suosivien painokertoimien yli yhtälöllä

$$w_i^c = \int_{\xi \in X} f_X(\xi) \int_{w \in W_i^r(\xi)} f_W(w) dw d\xi / a_i \quad (9)$$

SMAA-analyysin hyvänä puolena voidaan pitää mahdollisuutta tehdä analyysi ilman monissa muissa menetelmissä tarvittavaa preferenssidataa. SMAA-analyysissä voidaan myös käyttää preferenssidataa. Tässä työssä analyysi tehdään molemmilla tavoilla ja tarkastellaan preferenssitietojen käytön vaikutusta analyysin tuloksiin.

4.2.2 Taloudelliset laskentamenetelmät

Tuotantokustannuksia eri teknologioille voidaan verrata elinkaaren aikaisia tasoitettuja lämmöntuotantokustannuksia laskemalla. Tasoitettua tuotantokustannusta LCOH (*Levelized Cost of Heat*) voidaan käyttää verratessa eri tuotantomuotoja toisiinsa, kun tuotanto voi olla eri kokoluokkaa, investointikustannukset ovat erisuuruisia ja käyttöiät eripituisia. LCOH saadaan laskemalla yhteen elinkaarenaikaiset kustannukset tuotettua energiayksikköä kohti ja diskonttaamalla nämä aloitusvuoteen. (Short et al. 2005) Tasoitettu tuotantokustannus voidaan siis laskea yhtälöllä,

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{(investointikustannus + käyttö- ja huoltokustannus + polttoainekustannus)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{(tuotettu lämpö)}{(1+r)^t}} \quad (10)$$

jossa

r = diskonttaus korko,

t = vuosi ja

n = laitoksen käyttöikä.

Tasoitettun tuotantokustannuksen laskemiseen siis tarvitaan edellä mainitut elinkaaren aikaiset kustannustiedot eli investointikustannukset, käyttö- ja huoltokustannukset ja mahdolliset polttoainekustannukset sekä tuotettun lämmön määrä.

Aluksi lasketaan diskontattu kassavirta elinkaarenaikaisista kustannuksista. Tämän jälkeen lasketaan vuosittainen tuotettu lämpöenergiämäärä, jonka laskemiseen tarvitaan laitoksen tuotantoteho sekä vuotuiset käyttötunnit.

Tuotettu energiamäärä toisaalta riippuu huomattavasti vuotuisista käyttötunneista. Menetelmää voidaan soveltaa laskemaan lämmön tuotantokustannus myös huipunkäyttöajan funktiona. Tällöin voidaan arvioida myös huipunkäyttöajan vaikutusta lämmön tuotantokustannukseen.

Kuten monissa tutkimuksissa on huomattu, kustannusrakenteet uusiutuvien ja fossiilisten polttoaineiden välillä ovat tyypillisesti varsin erilaiset. Fossiilisilla polttoaineilla kustannukset painottuvat polttoainekustannuksiin, kun taas uusiutuvilla energianlähteillä kustannukset painottuvat puolestaan investointiin polttoainekustannusten ollessa jopa olemattomia. Tämän takia kustannukset sijoittuvat käyttöiän aikana hyvin eri kohtiin, minkä takia etenkin käytettävän korkokannan valinta ja laitoksen arvioitu käyttöikä vaikuttaa tavallista enemmän tasoitettun tuotantokustannuksen laskentaan. (Alberg Østergaard et al. 2010, Newell, Pizer 2004)

5 Soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät ja rajoitteet

Tässä luvussa tarkastellaan soveltuvuuteen vaikuttavia tekijöitä tarkasteltavassa kaupunkiympäristössä. Soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät ja rajoitteet on tärkeä tunnistaa, sillä ne määrittävät reunaehdot eri teknologioiden hyödyntämismahdollisuuksille. Vaikuttavien tekijöiden ja rajoitteiden tunnistamisen jälkeen voidaan vasta määrittää kriteerit teknologioiden vertailuun. Pääpiirteittäin soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa tekniisiin, taloudellisiin, ympäristöön liittyviin ja sosiaalisiin tekijöihin. Sosiaaliset tekijät on oletettu hyvin kompleksisiksi mitata ja jatkuvasti muuttuviksi, joten ne on jätetty tämän tarkastelun ulkopuolelle. Näin ollen tässä tarkastellaan soveltuvuutta teknisistä, taloudellisista sekä kaupunkiympäristön näkökulmista.

5.1 Tekniseen soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät

Eri teknisten vaihtoehtojen soveltuvuutta lämmön erillistuotantoon kaupunkiympäristössä määrittävät monet eri tekijät. Teknisen näkökulman perustana on toimintavarma lämmöntuotantojärjestelmä kaikissa olosuhteissa, jotta lämmöntuotannon huoltovarmuus säilyy. Lämmöntuotanto täytyy pystyä turvaamaan myös huippukulutuskausina, jolloin tarvitaan paljon myös tähän jouston vaatimukseen vastaamaan pystyvää kapasiteettia.

Teknistä soveltuvuutta mittaaviksi kriteereiksi voidaan todeta muun muassa energianlähteen saatavuus, sekä määrällisesti että tietynä ajankohtana, varastointimahdollisuudet, ja sen yksinkertaisuus, tekniikan joustavuus eli säädettävyyys sekä tekniikan kypsyys ja luotettavuus.

5.1.1 Saatavuus

Energian saatavuus on tärkeä huoltovarmuuteen vaikuttava tekijä. Käytettävän energianlähteen tulisi olla aina saatavilla, jotta lämmöntuotanto voitaisiin turvata vaihtelevan kysynnän tarpeisiin. Käyttövarmuuteen vaikuttaa etenkin polttoaineen tai energian saatavuudessa rajoitteet sekä ajankohdan että määrän suhteen. Monilla uusituvilla energianlähteillä ja polttoaineilla on puutteita saatavuudessa.

Biopolttoaineilla epävarmuus saatavuuden suhteen perustuu tuotantomääriin ja kilpailuviin käyttökohteisiin. Aurinkolämmöllä lämpöenergian saatavuus on heikoimmillaan juuri lämmityskauden kylmimpinä ajanjaksoina. Geotermisen energian epävarmuudet saatavuudessa piilevät maaperän mahdollisessa jäähtymisessä ja sähköä käyttävillä lämmöntuotantoteknologioilla hiilineutraalin sähkön saatavuudessa. Merivesilämpöpumpuilla epävarmuuksia on meriveden lämpötilan laskun suhteen talvella.

5.1.2 Varastoitavuus

Lämmöntuotannon tarpeen vaihtelevuuden vuoksi varastoitavuus on olennainen tekijä tekniikan soveltuvuudessa, sillä tuotanto on kyettävä sopeuttamaan kysyntään joko varastoimalla polttoainetta tai tuotettua lämpöä. Varastoinnin helppous kasvattaa huoltovarmuutta ja riippuu varaston tilantarpeesta sekä kustannusten suuruudesta. Lämmön varas-

tointi on suhteellisen yksinkertaista ja edullista verrattuna esimerkiksi sähkön varastointiin, sillä lämpöenergiaa voidaan varastoida helposti lämpimän veden varastoihin tai maaperään.

Polttoaineiden varastoitavuus vaihtelee myös niiden säilyvyysominaisuuksien mukaan. Fossiilisia polttoaineita on ollut perinteisesti helppo varastoida, sillä ne ovat muutenkin olleet varastoituneena maaperässä useita tuhansia vuosia. Biomassan suhteen varastointi ei ole yhtä suoraviivaista. Käsittelemättömän tai vain vähän käsitellyn biomassan kusteusprosentti on yleensä korkea, ja biomassaa voidaan varastoida ulkonakin ilman suojaa. Kuivatun biomassan kuivana pitämiseen tarvitaan useimmiten kuiva ja tuuletettu varastointitila tai -siilo. Eräät bioöljyt, kuten pyrolyysiprosesseissa syntyvät öljyt, eivät ole kovin pysyviä ja ovat lisäksi jonkin verran syövyttäviä, mikä voi vaikeuttaa pitkäaikaisvarastointia. Polttoaineiden varastoinnin sijaan tuotettua lämpöäkin voidaan varastoida käyttöä varten, mikä lisää varastoimattomien energialähteiden hyödyntämismahdollisuuksia. Hyvä varastoitavuus voikin kompensoida puutteita saatavuudessa.

5.1.3 Laitoksen luotettavuus

Lämmöntuotannon turvaamisen kannalta on olennaista, että käytettävä tuotantoteknologia toimii aina tarvittaessa. Laitoksen luotettavuuteen vaikuttaa etenkin tekniikan kypsyysaste. Mikäli tuotantoteknologia on epäluotettava, joudutaan varatuotantokapasiteettia rakentamaan sekä käyttämään enemmän. Varatuotantokapasiteetin käyttäminen voi olla vaikeaa sekä kallista, minkä takia pääasiallisten tuotantolaitosten kannattaa olla luotettavia. Lisäksi mikäli useat laitokset ovat epäluotettavia, voi kaukolämpöverkkoon kytketty käyttökelpoinen kapasiteetti olla liian pieni, mikäli moni laitos on huollossa samanaikaisesti.

Tekniikan kypsyysaste kertoo luotettavuudesta. Pitkään käytössä olleiden teknologioiden luotettavuutta on voitu arvioida pitkän käyttökokemuksen aikana ja luotettavasta käytöstä on jo muodostunut varsin hyvä kuva. Vasta tutkimus- ja kehitystasasteella tai demonstraatiovaiheessa olevien teknologioiden luotettavuutta on vaikeaa arvioida ennen käyttökokemusten hankkimista.

5.1.4 Käytön joustavuus ja säädettävyys

Soveltuvuuteen kaukolämmön erillistuotantoon vaikuttaa myös etenkin huippu- ja varatehokäytössä tekniikan joustavuus eli tuotantolaitoksen säädettävyysominaisuudet. Näihin kuuluvat etenkin tehon säätönopeus, laitoksen käynnistysnopeus ja käytettävissä olevan minimitehon osuus maksimitehosta. Huippu- ja varatuotantolaitokset on oltava nopeasti käynnistettävissä jopa täydelle teholle.

Lisäksi joustavuutta parantaa huomattavasti, mikäli laitoksia voidaan ajaa hyvällä hyötysuhteella myös osateholla. Osateholla ajon joustomahdollisuuksia voidaan lisätä myös esimerkiksi laitosten modulaarisuutta kasvattamalla eli hankkimalla yhden suuren kattilan sijasta kaksi pienempää, jolloin tehon säätömahdollisuudet lisääntyvät.

5.1.5 Teknisen potentiaalin rajoitteet

Aurinkolämmön tuotantopotentiaalin laskemiseksi on kerättävä historiallista dataa aurinkonsäteilymääristä Helsingissä. Laskentaan voidaan käyttää tyypillisten hyvälaatuisten keräimien hyötysuhteita tai halutun tyyppisiä keräimiä, joiden avulla voidaan saada laskettua arvio, paljonko Etelä-Suomen olosuhteissa aurinkolämpökeräimillä voidaan lämpöenergiaa tuottaa keräinpinta-alaa kohti. Lisäksi on huomioitava tuotannon ajankohta eli milloin tämä tuotantomäärä olisi käytettävissä, sillä lämmön hinta vaihtelee eri vuodenaikoina, sekä tulee huomioida mihin rajoittuu lämmityskaudella hyödynnettävissä oleva energiamäärä.

Biomassan potentiaalin määrittämisessä on huomioitava metsäbiomassan kestävä hakkuumäärä vuosittain, sekä eri biopolttoaineiden vuosittainen ensisijaisesti kotimainen tuotantomäärä. Samoin on huomioitu jätetuun vuosittainen keruumäärä ja eri puulaatujen lämpöarvot, joilla voidaan arvioida kuinka paljon polttoaine-energiaa on saatavilla. Tästä lämpölaitoksen hyötysuhteen huomioimalla saadaan arvio, kuinka paljon kaukolämpöenergiaa voitaisiin tuottaa.

Geotermisen energian määrä Helsingin seudulla voidaan määrittää geologisen datan ja geotermisen gradientin avulla. Lisäksi geotermisten lämpölaitosten maksimimäärän arvioimisessa voidaan käyttää keskimääräistä tilantarvetta, jota on käytetty Euroopassa. Näin ollen teoreettinen maksimipotentiaali voidaan laskea tilantarpeen mukaan. Toisaalta käyttö rajoittuu myös varastointikapasiteettiin, ja varastointikapasiteetin puutuessa laitokset kannattaa mitoittaa vain maksimi kesäajan tai vastaavan CHP-kapasiteetin mukaan.

Ympäristön lämmönlähteiden teoreettinen potentiaali on varsin laaja, sillä lämpöä on kaikkialla ympäristössä. Käytännössä ympäristön lämmönlähteiden käyttöä rajoittaa kuitenkin lämpöpumppujen tilantarve. Esimerkiksi merivesilämpöpumppujen potentiaalin voidaan mitoittaa käytettävissä olevan meren lähellä olevan tilan mukaan, joka sattuu olemaan riittävän lähellä kaukolämpöverkkoa. Maalämmön käyttöä rajoittaa myös maalämpökaivojen tilantarve, sillä suurien tehojen tuotantoon kaivoja tarvitaan suuri määrä. Ne voidaan tarvittaessa porata rakennusten alle ja vähentää siten maalämpökenttien vievää rakennuspinta-alaa.

Teollisuuden ja palveluiden ylijäämälämmön potentiaali riippuu pääosin siitä, millaista teollisuutta seudulla on tarpeeksi lähellä kaukolämpöverkon aluetta ja niiden lämmöntuotannon energiamääristä. Tämän selvittäminen vaatii yksityiskohtaisia selvitystöitä, jonka jälkeen tiedossa olevat lämmöntuotantomäärät voidaan laskea suoraviivaisesti yhteen. Matalan lämpötilan lämmönlähteissä on tosin huomioitava, että kaukolämpöveden menovettä alhaisemmissa lämpötiloissa saatavat lämmöt on yleensä korotettava lämpöpumpuilla korkeampaan lämpötilaan, mikä vaatii myös investointeja ja kuluttaa sähköenergiaa. Helsingin seudulla teollisuuden määrä on kuitenkin vähäistä, ja monissa näistäkin prosesseissa hukkalämmöt hyödynnetään jo itse prosessissa.

Sähkökattiloiden potentiaali on periaatteessa riippuvainen vain käytettävissä olevan uusiutuvan ja edullisen sähköenergian määrästä.

5.2 Ympäristövaikutukset

Ympäristö- ja ilmastotekijät liittyvät pääosin päästörajojen toteutumiseen. On huomioitava millaisia toimenpiteitä vaaditaan päästörajojen täyttämiseksi. Lisäksi on huomioitava millainen riski ympäristö- ja ilmastosäädösten muuttumisesta tai tiukentumisesta tekniikalle aiheutuu. Kaikilla tekniikoilla on joitain elinkaarenaikaisia paikallisia ympäristö- ja globaaleja ilmastovaikutuksia, mutta tässä tarkastelu on rajattu vain käytön aikaisiin vaikutuksiin. Lisäksi biomassan käytön kestävyyskriteerien määrittely voi rajoittaa kaikkien biojakeiden käyttöä.

Mikäli polttolaitoksissa ei ole tarpeellisia savukaasun puhdistuslaitteistoja, voi ympäristöön päästä NO_x-, SO_x- ja hiukkaspäästöjä. Nestemäisiä biopolttoaineita käytettäessä voi polttoaine luontoon päätyessään aiheuttaa paikallisen ekokatastrofin sekä pohjavesien saastumista. Lisäksi laitosten tuottamat jätteet, kuten pohjatuhka voivat aiheuttaa ympäristöongelmia. Joissain tapauksissa ympäristöön päätyvä melu voi aiheuttaa terveysongelmia ympäristön asukkaille. Nämä ominaisuudet eivät ole yksinään hiilineutraalien tuotantoteknologioiden ongelmia, vaan yleisesti kaikkeen energiantuotantoon liittyviä haasteita.

5.2.1 Tilantarve ja logistiikka

Tiivis kaupunkiympäristö asettaa kaukolämpöjärjestelmälle omat rajoitteensa, jotka riippuvat myös aina alueellisista ilmasto- ja maantieteellisistä tekijöistä. Suuressa kaupungissa lämmönjakeluverkostolle on etuna suuri asutuksen tiheys, joka parantaa verkoston hyötysuhdetta, kun etäisyydet käyttäjien välillä eivät ole pitkät, eikä siirrosta aiheudu paljoa lämpöhäviöitä. Toisaalta kaupunkiympäristössä lämmöntuotantolaitoksille ei ole käytettävissä rajattomasti tilaa, ja tonttimaa on kallista. Kaupungin maankäyttö on lisäksi rajoitettu kaavoituksella, joten kaupunkiympäristö suosii vähän tilaa vieviä ratkaisuja.

Kaukolämmön jakelun kannalta tuotanto on myös sijoitettava hajautetusti ympäri kaupunkia, niin että kaikkien alueiden lämmöntarve tulee katettua tasaisesti, sillä kuluttajatkin ovat jakautuneet ympäri kaupunkia. Näin ollen myös kaikkein tiiviimmillä keskusta-alueilla, joissa suurin kulutuskeskittymä on, tarvitaan myös tuotantolaitoksia. Kokonaisratkaisussa tarvitaan siis myös aivan keskusta-alueelle mahtuvaa teknologiaa.

Eri teknologioiden tilantarpeet vaihtelevat suurestikin. Mitä energiatiheämmässä muodossa polttoaine on, sitä vähemmän varastointitilaa se tarvitsee. Aurinkolämpölaitos ja suuri kausivarasto vaativat paljon tilaa. Toisaalta nämä voidaan sijoittaa myös varastoon maan alle ja aurinkolämpökeräimet katoille, jolloin uutta kaupunkipinta-alaa ei tarvita. Biopolttoaineiden polttaminen olemassa olevissa laitoksissa kuuluu taas vähiten uutta tilaa vaativiin ratkaisuihin.

Kaupungin lämmöntarpeen ollessa suuri kuluu polttoainetta energian tuotannossa paljon. Mikäli lämmöntuotannossa käytetään paljon biopolttoaineita, on tärkeää, että logistiikka aiheuttaa mahdollisimman vähän haittaa kaupungin asukkaille ja muulle liikenteelle. Mikäli biopolttoainetta ei voida tuoda suoraan lämpölaitokselle meriteitse tai rautateillä, voi maantiekuljetus aiheuttaa paikallisia ongelmia sekä merkittäviä polttoaineen kuljetuksiin liittyviä päästöjä.

5.2.2 Päästöjen väheneminen

Nykyisellä laskentatavalla määritettynä biomassapohjaisen polttoaineen polttaminen on hiilineutraalia. Tällöin kaikki tuotettu energia on CO₂-neutraalia ja lasketaan päästöjen vähentymiseksi verrattuna perinteisiin lämpölaitoksiin. Toisaalta myös biomassan polttamisessa syntyy pienhiukkas-, ja NO_x -päästöjä. Ympäristö- ja ilmastovaikutuksiltaan edullisimpia ratkaisuja ovat vaihtoehdot, jotka eivät kuluta lainkaan polttoainetta tai sähköä, jollaisia ovat esimerkiksi aurinkolämpöratkaisut. Seuraavana tulevat vain vähän pumppaukseen sähköä käyttävät ratkaisut, kuten geotermien energia ja lämpövarastot ilman lämpöpumppua. Tämän jälkeen tulevat sähköä lämmöntuotantoon käyttävät ratkaisut eli eri lämmönlähteitä käyttävät lämpöpumput ja sähkökattilat. Näiden vaikutukset tosin riippuvat suuresti sähköntuotannon lähteestä. Viimeisenä tulevat polttotekniikkaan perustuvat ratkaisut. Näiden keskinäiseen vertailuun vaikuttavat muun muassa kattilan hyötysuhde, savukaasujen puhdistustekniikka, polttoaineen koostumus, lämpöarvo ja kuljetusmatka.

Sähkökattiloiden sekä lämpöpumppujen tapauksessa lämmöntuotanto on hiilineutraalia, mikäli käytetty sähkö on tuotettu hiilineutraalisti. Jos käytetty sähkö on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla, ei sähkökattiloita ja lämpöpumppujakaan voida pitää hiilineutraaleina. Toisaalta myös lämpöpumppujärjestelmistä vuotavat kylmäaineet toimivat kuten hiilidioksidi, mutta tehokkaammin, eli hiilineutraaleilla tuotantomenetelmilläkin on omat päästönsä. Vastaavasti lämpövarastoista käytettävä lämpö on riippuvainen tuotantotavasta, jolla lämpö on tuotettu varastoon. Lämpövarastosta otettava lämpö on hiilineutraalia, vain jos sen tuottamisessa käytetty menetelmä on hiilineutraali. Lämpövarastojen käyttö ei siis suoraan välttämättä vaikuta päästöjen vähentymiseen.

5.3 Taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat tekijät

Soveltuvuuteen vaikuttavia tekijöitä määritettäessä on käytännön ja teknisten seikkojen lisäksi tärkeää kiinnittää huomiota etenkin taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaviin tekijöihin. Teknisen soveltuvuuden tarkastelun lisäksi on olennaista tehdä toteuttamiskelpoisten ratkaisujen vertailemiseksi myös kannattavuustarkastelua. Hiilineutraalien teknologioiden käyttöönotto on ennen kaikkea myös investointien suunnittelua, jossa on kyse taloudellisista päätöksistä. Taloudellista kannattavuutta vertaillaan, jotta voidaan todeta, mitkä teknologioista ovat lähimpänä kannattavuutta tai jo kannattavia perinteiseen tuotantoon verrattuna. Yleinen tapa mitata kannattavuutta on kustannus-hyötyanalyysi (*engl.*

CBA, Cost-Benefit Analysis), jossa arvioidaan ylittävätkö projektin hyödyt sen kustannukset eli onko projektin nettonykyarvo positiivinen. Tässä tarkastelussa kaikki vaihtoehdot ovat lähtökohtaisesti hiilineutraaleja eli hiilidioksidipäästöjen vähentämisen suhteen niiden hyödyt oletetaan yhtä suuriksi. Käytännössä hyötyjä jää mittaamaan vain tuotettu energiamäärä eli kustannus-hyötysuhdetta voidaan yksinkertaistetusti kuvata tasoitetulla tuotantokustannuksella tässä hiilineutraalin lämmöntuotannon tapauksessa.

Taloudellisen kannattavuuden muodostumisessa on kuitenkin useampia osatekijöitä, kuten investointikustannukset, käytönajan kustannukset, näissäkin sisältäen erilaiset muutuvat ja kiinteät kustannukset, joista saadaan sitten laskettua myös tuotantokustannukset tuotettua yksikköä kohti. Kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi lämpöenergian hinnoittelun kehitys, kilpailukyky, sekä talouteen vaikuttavat poliittiset ja lainsäädännölliset tekijät, kuten taloudellisten tukimekanismien muutokset.

5.3.1 Investointikustannukset

Investointikustannukset ovat kustannusten se osa, joka realisoituvat heti investointipäätöksen jälkeen ensimmäisinä ja ovat usein myös suurin yksittäinen kustannustekijä. Investointi voidaan rahoittaa myös lainarahalla. Energian tuotantoinvestoinneissa kustannukset koostuvat usein tekijöistä, joita aiheuttavat maanrakennus, rakennukset, pääasiallinen laitteisto, sähköasennus, koneasennus, suunnittelutyö ja yleisurakointityö. (Ghafghazi et al. 2010b)

Esimerkiksi puupellettijärjestelmissä investoitavan laitteiston osia yleensä ovat pelletin varastointisiilo, sykloni, ja sähkösuodatin riippumatta kattilatekniikasta. Kattilateknisiä vaihtoehtoja ovat esimerkiksi liikkuva arina, kiinteäpetikaasutin ja pölypoltto. Liikkuvaan arinakattilaan kuuluu arinapoltin ja -kattila. Puupelletin kaasutintekniikkaan kuuluu esimerkiksi kiinteäpetikaasutin, hapetin ja kattila, kun taas pölypolttotekniikkaan kuuluu vasaramylly, pölypoltin ja -kattila. (Ghafghazi et al. 2010b)

Jäteveden lämmönkeräysjärjestelmässä yleisiä investoitavan laitteiston osia ovat lämmönvaihdin, lämpöpumppu, yhdistävät putket jätevedenkäsittelyn ja lämpöpumpun välillä, lauhdutinlaitteisto ja jäteveden esikäsittely-yksikkö. Geotermisen lämmön siirtojärjestelmässä pääkomponentteja ovat yleensä lämmönvaihdin, lämpöpumppu, geotermiset porauskaivot ja yhdistävät putket kaivojen ja laitoksen välillä. (Ghafghazi et al. 2010b)

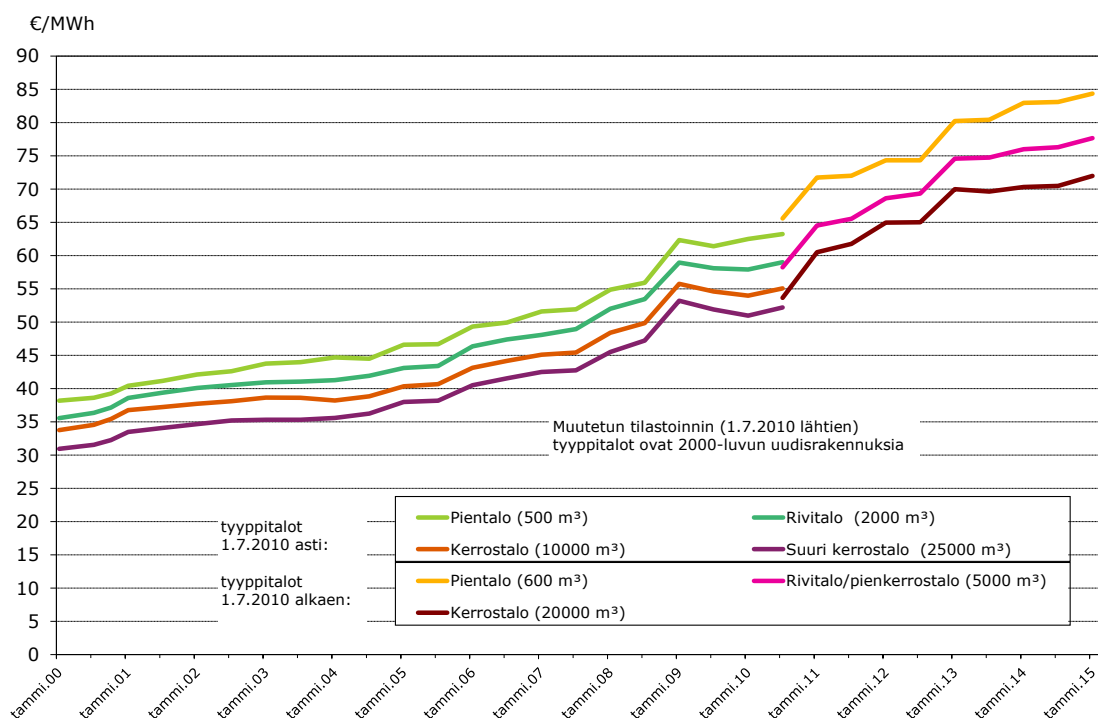
5.3.2 Käyttö-, huolto- ja polttoainekustannukset

Yleensä pääasialliset toimintakustannukset eli operatiiviset kustannukset energiantuotantovaihtoehtoisissa sisältävät ainakin polttoaineen tai energian kustannukset, huoltokustannukset ja käyttöhenkilökunnan kustannukset. Veroedut poistoista ja toimintakustannuksista voidaan myös ottaa huomioon. Samoin kuin rakennuksen ja laitteiston jäännösarvo käyttöiän päättyessä voidaan huomioida. (Ghafghazi et al. 2010b)

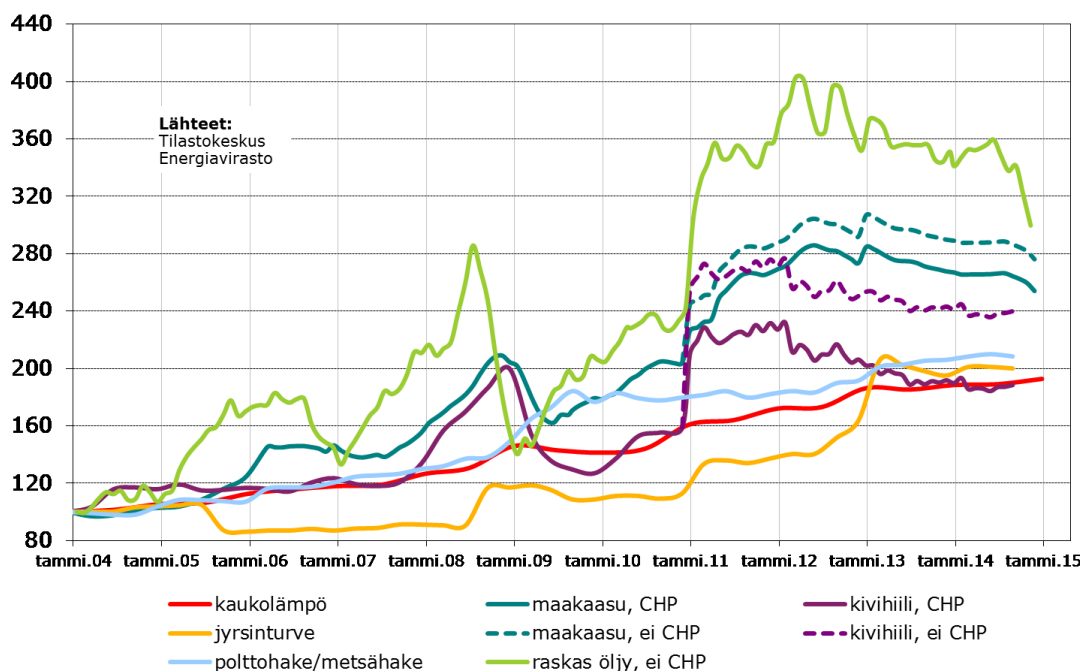
Mitä suurempi huipunkäyttöaika laitoksessa on, sitä enemmän merkitsevät toimintakustannukset suhteessa investointikustannuksiin. Sitä vastoin mitä pienempi huipunkäyttöaika on, sitä suuremman merkityksen investointikustannukset saavat suhteessa toimintakustannuksiin. Laitosten ajojärjestykseen vaikuttavat merkittävästi nämä kustannukset.

5.3.3 Kaukolämmön kustannuskehitys

Kaukolämmön hinnan kehitys Suomessa vuodesta 2000 nykyhetkeen on esitetty kuvassa 23. Kehitys on tällä vuosituhannella ollut selvästi nousujohteista. Tämä on johtunut pääosin siitä, että kaukolämmön tuotantokustannukset ovat nousseet. Kaukolämmön tuotannossa käytettyjen polttoaineiden hintojen kehitys on esitetty kuvassa 24. Polttoaineiden hinnoista nähdään, että mikäli nykyinen nouseva trendi jatkuu, paranee polttoainetta säästävien investointien kannattavuus. Toisaalta viimeisien vuosien aikana lähestulkoon kaikkien polttoaineiden hinta on laskenut. Mikäli hinnan lasku jatkuu, niin tilanne ei kannusta investoimaan kalliisiin polttoainetta säästäviin teknologioihin.



Kuva 23.. Kaukolämmön kuluttajahinnan kehitys Suomessa sisältäen teho- ja energiamaksut sekä verot. (Energiateollisuus ry 2015b)



Kuva 24. Kaukolämmön tuotannossa käytettyjen polttoaineiden hintojen kehitys (indeksi, tammikuu 2004 = 100). (Energiateollisuus ry 2015b)

5.3.4 Poliittiset ja lainsäädännölliset tekijät

Nykyisten tuotantomenetelmien kannattavuus voi myös tulevaisuudessa muuttua erilaisien lisääntyvien ilmastomuutoksen hillintään liittyvien säädösten myötä. Tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa uusiutuvien energiantuotantomuotojen kilpailukykyyn paranemiseen ovat esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden verotuksen kiristyminen, päästökaupan tiukentuminen ja päästöoikeuksien hinnannousu. Lisäksi vaikuttavat kaikkien päästöjen tiukentuvat päästöraajat, mukaan lukien SO_x -, NO_x - ja hiukkaspäästöt. Myös taloudelliset tukimekanismit, kuten syöttötariffit, uusiutuville lämmöntuotantomuodoille voivat vaikuttaa taloudelliseen kannattavuuteen. Poliittisilla päätöksillä voidaan ohjata tuotantoa kohti haluttua teknologiaa, vaikkei se kyseisellä hetkellä olisikaan paras käytettävissä oleva teknologia.

Biomassan käytölle mahdollisesti määritettävät kestävyyskriteerit Euroopan Unionissa voisivat rajoittaa biomassan käyttöä. Lisäksi muut direktiivit, kuten teollisuuspäästödirektiivi, joka rajoittaa etenkin lämpölaitosten rikkipäästöjä vaikuttavat eri teknologioiden kannattavuuteen. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2010)

6 Teknologioiden soveltuvuuden vertailu

Tässä luvussa vertaillaan lämmöntuotantovaihtoehtoja eri näkökulmista. Vertailussa käytetään ensin monikriteerianalyttistä menetelmää, jossa huomioidaan useita eri soveltuvuuteen vaikuttavia tekijöitä. Vertailun keskeiset vaiheet ja saadut tulokset esitetään tässä luvussa. Toinen menetelmä teknologioiden vertailuun on taloudellista näkökulmaa painottava ja siinä arvioidaan eri teknologioiden tasoitettuja lämmöntuotantokustannuksia. Taloudellisen vertailun tulokset on myös esitetty tässä luvussa. Lisäksi analyysimenetelmillä saaduille tuloksille tehdään luotettavuus- ja herkkyystarkasteluja.

6.1 Monikriteerianalyttinen vertailu

Koska hiilineutraalien teknologioiden soveltuvuuteen kaupunkiympäristössä vaikuttavat monet eri tekijät, on loogista valita vertailutavaksi monikriteerianalyttinen lähestymistapa. Monesti teknisiä vaihtoehtoja on perinteisesti arvoitu vain kustannusanalyysin perusteella, mutta järjestelmän ollessa kompleksisempi on otettava huomioon useita tekijöitä. Tällöin vertailumenetelmäksi sopii erityisen hyvin monikriteerianalyttinen menetelmä. (Ghafghazi et al. 2010a)

Monikriteerianalyysin aluksi määritettiin käytettävät kriteerit ja valittiin arvioitavat teknologiat kirjallisuustutkimuksen perusteella. Valituista tutkittavista vaihtoehdoista ja kriteereistä muodostettiin matriisi, jossa jokaista teknologiaa voitiin arvioida kaikkien kriteerin osalta. Matriisin arvot voidaan määrittää esimerkiksi kirjallisuustutkimuksen perusteella käyttäen luotettavista kirjallisuuslähteistä saatua dataa. Toinen tapa on asiantuntijapaneelin käyttäminen teknologioiden arvottamisessa, mihin tässä tutkimuksessa päädyttiin. Seuraavissa kappaleissa esitellään tässä tutkimuksessa monikriteerianalyysissä tarkastellut vaihtoehdot, määritetyt kriteerit sekä analyysin tulokset.

6.1.1 Tarkasteltavat vaihtoehdot

Tässä työssä tutkittaviksi teknologiavaihtoehdoiksi valittiin kirjallisuustutkimuksen perusteella seuraavaksi esiteltävät lämmöntuotantovaihtoehdot. Tutkimuksessa tarkasteltavat lämmöntuotantomuodot perustuvat biopolttoaineiden polttoon, aurinkolämpöön, geotermiseen energiaan, lämpöpumppuratkaisuihin, huipputuotantoa korvaavaan lämmönvarastointiin, hiilineutraalia sähköä käyttäviin sähkökattiloihin ja CCS-tekniikkaan. Vaihtoehdot on numeroitu taulukoiden ja kuvaajien selkeyttämiseksi. Tarkasteluun valikoitiin nykyään tai tulevaisuudessa potentiaalisia vaihtoehtoja pelkän lämmön tuotantoon.

Biomassaan perustuvia erilaisia lämmöntuotantovaihtoehtoja analyysiin otettiin mukaan kymmenen (A1-A10). Näistä ensimmäiset neljä ovat metsähakkeen ja muun metsäbiomassan tai muun biomassan erilaisia konfiguraatiota kiinteän polttoaineen kattiloissa. Tämän lisäksi valittiin kaksi biomassan polttovaihtoehtoa kaasukattilassa, joko kaasuttimella kattilan yhteydessä tuotettua tai kaasuverkon kautta laitokselle muualta tuotua ja tuotettua biokaasua. Näiden jälkeen teknologioina ovat puupelletin ja jalostetun pelletin

eli biohiilen pölypolttoteknologiat, joiden jälkeen nestemäiset biopolttoaineet eli biodiesel ja pyrolyysiöljy.

Aurinkolämpöön perustuvista lämmöntuotantovaihtoehdoista (A11-13) otettiin tarkasteluun mukaan kolme teknistä konfiguraatiota, joita olivat ilman erillistä omaa varastoa toimiva aurinkolämpökeräinkenttä, joka hyödyntää kaukolämpöverkossa jo olevaa varastointikapasiteettia, sekä aurinkolämpölaitos lyhytaikaisvarastolla ja aurinkolämpö pitkäaikaisvaraston yhteydessä.

Lisäksi analyysiin otettiin geoterminen lämpölaitos (A14), maalämpö (A15), merivesilämpö (A16), matalan lämpötilan ylijäämälämpöjen lämpöpumppulaitos (A17), lyhytaikaislämpövarasto vesisäiliössä (A18), maanalainen kausilämpövarasto (A19), sähkökattilat hiilineutraalisti tuotetulla sähköllä (A20) ja CCS-teknologia hyödynnettynä olemassa olevissa laitoksissa (A21). Nämä tarkasteluun otetut vaihtoehdot on esitetty alla taulukossa 9.

Taulukko 9. Analyysissä vertaillut lämmöntuotantomuodot ja niistä käytetyt merkinnät.

| <i>Tuotantomuodot</i> | |
|------------------------------|---|
| <i>A1</i> | Metsähakkeen poltto leijupetikattilassa |
| <i>A2</i> | Metsähake-monipolttoaine (jätepuu, peltobiomassa yms.) leijupetikattila |
| <i>A3</i> | Metsähakkeen poltto arinakattilassa |
| <i>A4</i> | Metsähake-monipolttoaine arinakattila |
| <i>A5</i> | Metsäbiomassan terminen kaasutus ja poltto kaasukattilassa |
| <i>A6</i> | Biokaasun poltto kaasukattilassa (tuotu muualta kaasuverkon kautta) |
| <i>A7</i> | Puupelletin pölypolttolaitos |
| <i>A8</i> | Jalostetun pelletin tai biohiilen (torrefioitu/höyry) pölypolttolaitos |
| <i>A9</i> | Biodieselin käyttö öljykattilassa |
| <i>A10</i> | Pyrolyysiöljyn käyttö öljykattilassa (retrofit) |
| <i>A11</i> | Aurinkolämpölaitos ja maanalainen (lämpöpumppuavusteinen) kausivarasto |
| <i>A12</i> | Aurinkolämpölaitos ja lyhytaikaislämpövarasto |
| <i>A13</i> | Aurinkolämpölaitos ilman erillistä varastoa |
| <i>A14</i> | Geoterminen lämpölaitos (syvälämpö 6-7 km) |
| <i>A15</i> | Maalämpöpumppu porakaivokentällä |
| <i>A16</i> | Merivesilämpöpumppulaitos |
| <i>A17</i> | Matalan lämpötilan ylijäämälämpö, lämpöpumppu (teollisuus, kauppa ym.) |
| <i>A18</i> | Lyhytaikaislämpövarasto (vesisäiliöt) |
| <i>A19</i> | Kausilämpövarastot (maaperä/kalliovarasto) |
| <i>A20</i> | Sähkökattilat (hiilineutraali sähkö) |
| <i>A21</i> | CCS-teknologia hyödynnettynä olemassa olevissa laitoksissa |

6.1.2 Kriteerien määrittäminen ja arviointiperusteet

Kriteerit voitiin identifioida tarkasteltavassa kaupunkiympäristössä soveltuvuuteen vaikuttavien tekijöiden tarkastelun perusteella, joka on esitetty luvussa 5. Ne voitiin jaotella kahteen eri hierarkiatasoon, joista ylemmällä hierarkiatasolla on kolme pääkriteeriluokkaa ja niiden alla yhteensä 10 alakriteeriä. Ylemmän hierarkiatason kriteerit ovat tekniset, taloudelliset, ja ympäristölliset kriteerit. Nämä jakaantuvat alemmalla hierarkiatasolla vielä alakriteereiksi jokaiseen luokkaan. Näitä kriteereitä ovat investointikustannukset, lämmön tasoitettu tuotantokustannus, energian tai polttoaineen saatavuus, varastoitavuus, joustavuus, tekniikan kypsyysaste, tilantarve, logistiikan tarve, hiilidioksidipäästöjen väheneminen ja muiden päästöjen väheneminen.

Kriteerit on määritetty erillistuotannon näkökulmasta koko lämmöntuotannon toimivuutta korostaen. Tästä syystä kriteerit siis korostavat ominaisuuksia, joita vaaditaan etenkin huippu- ja varalämmöntuotantoon sopivilta teknologioilta. Näillä kriteereillä vertailtaessa esiin nousee siis erityisesti huipputehon ja varatehon tuotantoon soveltuvia tekniikoita, sillä on haluttu pyrkiä varmistamaan tuotantojärjestelmän toimintavarmuus kaikissa tilanteissa. Kokonaistuotantojärjestelmän toimintavarmuuden kannalta on olennaista, että tuotannossa on myös hyvin joustavia ja huippukulutuskausien kysyntään vastaamaan pystyviä laitoksia. Tyypillisesti erillistuotantolaitoksia on käytetty juuri tässä tarkoituksessa. Tässä analyysissä käytetyt kriteerit ja niiden kuvaukset on esitetty taulukossa 10.

Toisaalta lämmöntuotannon kokonaisjärjestelmässä kaikkien tuotantomuotojen ei tarvitse olla joustavia ja helposti säädettävissä, vaan osa voin toimia vain perus- ja keskitehon tuotannossa. Mikäli haluttaisiin vertailla etenkin perustehontuotantoon soveltuvia teknologioita, kriteerit tulisi siis valita hieman eri tavalla.

Ensimmäinen käytettyihin kriteereihin valituista taloudellisista tekijöistä on investointikustannus, sillä investoinnin suuruus vaikuttaa olennaisesti myös tuotetun lämmön kustannuksiin. Lisäksi investointi on kustannusten se osa, joka realisoituu heti investoinnin alussa nykyarvolaskennan alkuhetkellä. Investointikustannuksia vertaillaan usein suhteutettuna tehoon yksikössä €/MW. Usein energiantuotannossa investointikustannukset ovat myös huomattavan suuri osa kaikkia kustannuksia, etenkin uusiutuvan energian investoinneissa, joissa vastaavasti käyttökustannukset voivat olla hyvinkin pienet. Investointikustannusten osuus korostuu myös hyvin vähille käyttötunneille jäävissä laitoksissa, joita on tyypillisesti suuri osa lämpölaitoksista lämmöntarpeen suuren kausittaisen vaihtelun takia.

Taloudellisiin kriteereihin on valittu lisäksi lämmön tasoitettu tuotantokustannus. Lämmön tuotantokustannus määrittää nimittäin tuotetun lämmön arvon, ja on olennaista, ettei lämmön arvo nouse liian korkeaksi verrattuna muihin tuotantotapoihin. Lämmön tuotantokustannus on riippuvainen etenkin vuosittain tuotetun lämmön määrästä sekä kyseisen lämmöntuotantotavan elinkaarenaikaisista kokonaiskustannuksista. Lämmön tasoitettu tuotantokustannus voidaan yleensä ilmaista yksiköissä €/MWh.

Taulukko 10. SMAA-analyysissä käytetyt kriteerit.

| | Kriteerit | Kuvaus |
|----------------------|---------------------------------|---|
| Taloudelliset | C1 Investointikustannukset | Kuvaa investointihetkellä syntyviä kustannuksia ja suhteessa laitoksen tehoon (€/MW) |
| | C2 Tasoitettu tuotantokustannus | Kuvaa tuotannon kokonaiskuluja energiayksikköä kohti oletetulla pitoajalla (<i>LCOH, Levelized cost of heat</i>) (€/MWh) |
| Tekniset | C3 Saatavuus | Kuvaa polttoaineen tai energialähteen saatavuutta tai rajallisuutta määrässä tai tietyssä ajankohtana |
| | C4 Varastoitavuus | Kuvaa polttoaineen tai energianlähteen varastoitavuuden yksinkertaisuutta esimerkiksi tarvittavaa varastointitekniikkaa ja mahdollista varastointiaikaa |
| | C5 Joustavuus | Kuvaa laitoksen säädettävyyttä ja käytettävyyttä osakuormilla. Ominaisuuksia ovat esimerkiksi minimiteho, tehon säätönopeus, käynnistysnopeus. |
| | C6 Tekniikan kypsyysaste | Kuvaa tekniikan luotettavuutta ja sitä kautta myös toimintavarmuutta, ja voidaan ilmaista S-käyrällä: tutkimus- ja kehitysaste, demonstraatio, esikaupallinen, kaupallinen teknologia |
| Ympäristö | C7 Tilantarve | Kuvaa laitosten tarvitsemaa uutta tilantarvetta (m ² /MW) |
| | C8 Logistiikka | Kuvaa tekniikan käytön aiheuttamaa lisälogistiikan tarvetta (esim. polttoainekuljetukset) |
| | C9 Hiilidioksidipäästöt | Kuvaa CO ₂ -päästöjen vähentämismahdollisuuksia |
| | C10 Muut päästöt | Kuvaa muiden päästöjen vähentämismahdollisuuksia (SO _x -, NO _x - ja hiukkaspäästöt,) |

Teknisistä tekijöistä tähän tarkasteluun katsottiin ensinnäkin olennaiseksi energianlähteen tai polttoaineen saatavuus. Saatavuudella on nimittäin tärkeä osuus laitoksen käytettävyydessä eli käyttövarmuudessa. Lisäksi tekniseksi kriteeriksi valittiin polttoaineen tai energian varastoitavuusominaisuudet, joihin vaikuttavat muun muassa varaston tilantarve ja mahdollinen varastointiaika. Joustavuus eli lämmöntuotantolaitokset säädettävyyssominaisuudet valittiin myös tarkasteltavien teknisten kriteerien joukkoon tässä analyysissä. Joustavuuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten mikä on mahdollisesti ajettavan minimitehon suuruus verrattuna laitoksen nimellistehoon tai kuinka nopeasti teho on säädettävissä

esimerkiksi minimitehosta maksimitehoon ja mikä on laitoksen käynnistysnopeus. Lisäksi kriteeriksi valittiin tekniikan kypsyysaste kuvaamaan tekniikan luotettavuutta, joka on tärkeä ominaisuus etenkin kaukolämmön huoltovarmuuden turvaamisen kannalta.

Ympäristönäkökulmiin liittyviksi kriteereiksi valittiin tässä analyysissä tilantarve, logistiikka, hiilidioksidipäästöjen väheneminen ja muiden päästöjen väheneminen. Tiiviissä kaupunkiympäristössä vähän tilaa vievillä ratkaisuilla on etunsa. Vastaavasti pienimmän logistiikan tarpeen omaavat ratkaisut ovat edullisimpia kaupunkiympäristössä. Päästöjen vähenemisen suhteen ne ratkaisut ovat parhaita, jotka vähentävät eniten hiilidioksidi ja muita päästöjä. Ympäristö- ja ilmastovaikutuksiltaan edullisimpia ratkaisuja ovat vaihtoehdot, jotka eivät kuluta lainkaan polttoainetta tai sähköä

6.1.3 Kriteerianalyysin tulokset

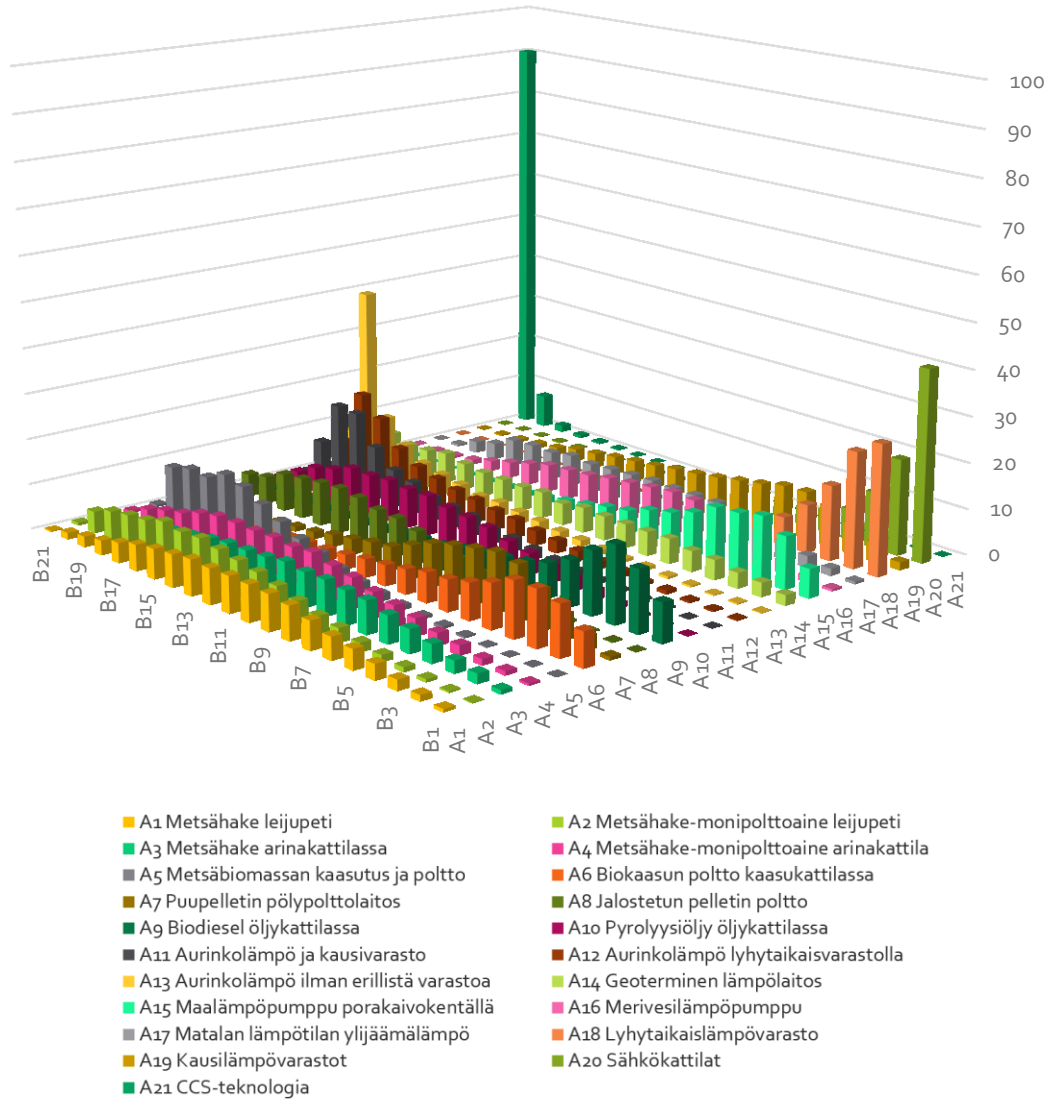
Monikriteerianalyysiä varten kerättiin asiantuntijapaneelilla aineistoa kunkin teknologian ominaisuuksien arvioinnista valittujen kriteerien osalta. Asiantuntijapaneeli koostui monien erikoistumisalueiden asiantuntijoista, jotka vastasivat kyselyyn anonyymisti ja toisista osallistujista riippumatta. Matriisi lähetettiin 17 asiantuntijalle Helen Oy:llä ja vastauksia saatiin 10 kpl. Saaduista vastauksista muodostettiin asiantuntijapaneelin keskiarvot. Lisäksi asiantuntijapaneelin keskihajontoja käytettiin analyysin epävarmuuksien arvioinnissa. Asiantuntijapaneelilla kerätyt keskiarvot sekä keskihajonnat on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

Asiantuntijapaneelin keskiarvomatriisia epävarmuuksineen käytettiin tässä työssä laaditussa taulukkolaskentamallissa, joka määrittä SMAA-analyysin mukaiset vertailuparametrit. Saadut parametrit tarkistettiin lisäksi SMAA-analyysityökalulla. Taulukkolaskentatyökalu sekä SMAA-analyysityökalu määrittivät analyysin keskeiset parametrit Monte Carlo –simulointia käyttäen yli 10 000 simulointikierroksella.

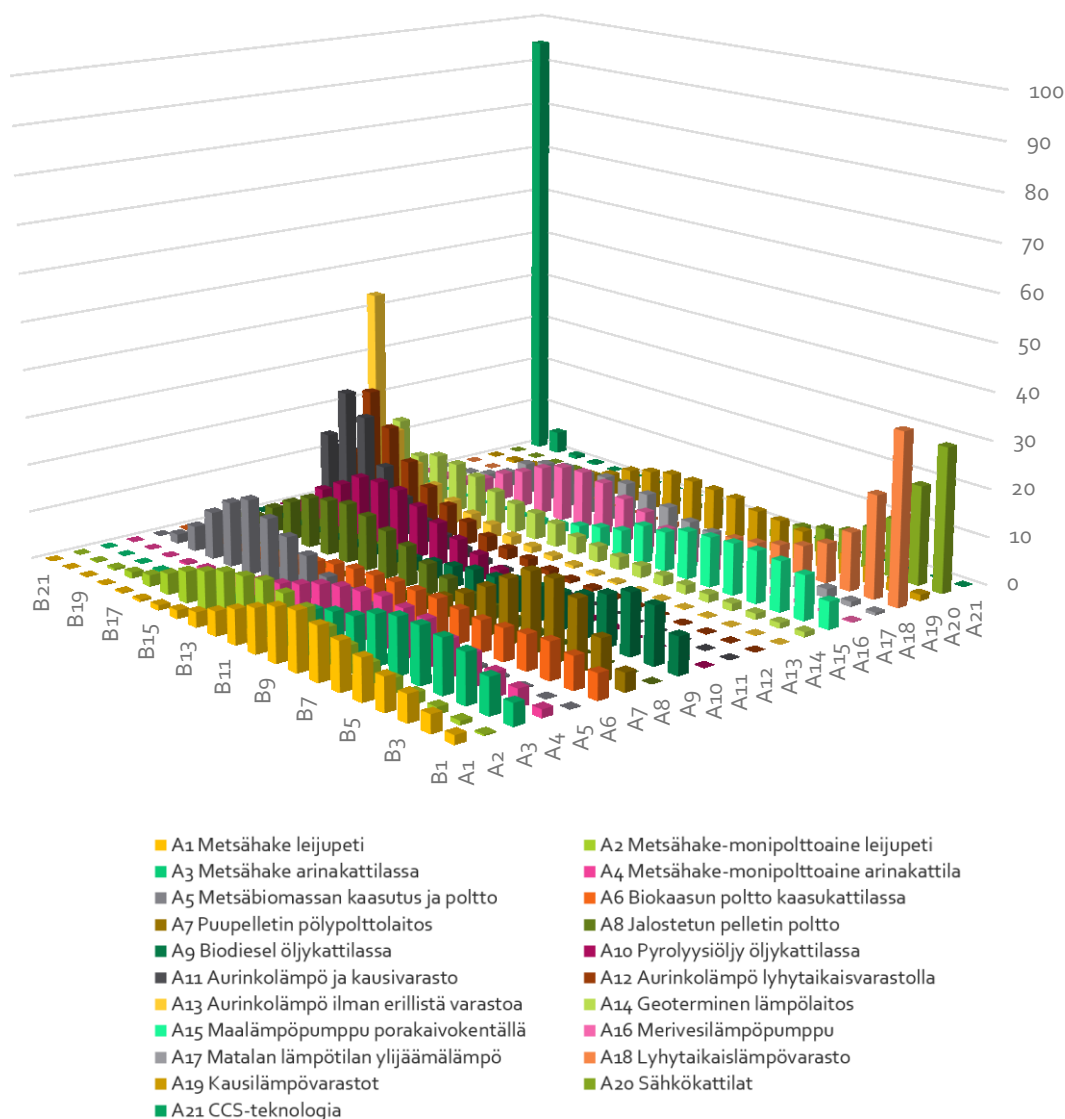
Ensimmäinen analyysin vaihe on sijaluvun hyväksyttävyyssindeksien määrittäminen eri vaihtoehtoille. Sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit on esitetty kuvaajissa 25 ja 26. Kuvaaja 25 esittää hyväksyttävyyssindeksejä analyysissä ilman asiantuntijoiden preferenssidataa. Kuvaaja 26 esittää puolestaan tulokset analyysistä, jossa asiantuntijoiden preferenssidataa käytettiin. Leveysakselilla on esitetty eri tuotantovaihtoehdot A1-A21. Syvyysakselilla näkyvät vertailun sijaluvut paremmuusjärjestyksessä B1-B21. Mitä korkeampi pylväs tuotantovaihtoehdolla A1-A21 on sijoituksen kohdalla, sitä useammin vaihtoehto sijoittuu kyseiselle sijalle B1-B21. B1 on paras mahdollinen sijoitus ja B21 on huonoin mahdollinen sijoitus. Pystyakselilla on kuvattuna hyväksyttävyyssindeksi prosenttiluvuissa ilmaistuna. Hyväksyttävyyssindeksin prosenttiluku kuvaa, kuinka suurella osalla simulointikierroksista kyseinen vaihtoehto sijoittuu kyseiselle sijalle.

Kuvaajasta 25 nähdään, että parhaimman ensimmäisen sijan hyväksyttävyyden saa vaihtoehto A20 eli sähkökattilat (41,68 %). Tämä tarkoittaa, että se on todennäköisimmin useimmilla preferenssijakaumilla parhaiten sijoittuva vaihtoehto. Toiseksi korkeimman

ensimmäisen sijan hyväksyttävyyden (28,34 %) saa vaihtoehto A18 eli lyhytaikaislämpövarastot. Seuraavina ovat A9 eli biodieselin käyttö öljykattilassa (8,48 %), A6 eli verkosta ostetun biokaasun poltto maakaasukattiloissa (7,42 %) ja A15 eli maalämpöpumppu porakaivokentällä (6,23 %). Korkeimman hyväksyttävyyden viimeiselle sijalle saaneet vaihtoehdot puolestaan ovat useimmilla kriteerien painotuksilla vältettävimpiä. Näistä selvimmin erottuu A21 eli CCS-tekniiikan hyödyntäminen (90,21 %). Toiseksi viimeisen sijan suurimman hyväksyttävyyden sai A13 eli aurinkolämpölaite ilman erillistä varastoa (40,84 %).



Kuva 25. Sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit (rank acceptability indices) vaihtoehdoille asiantuntijoiden arvioilla ilman painoarvoja.

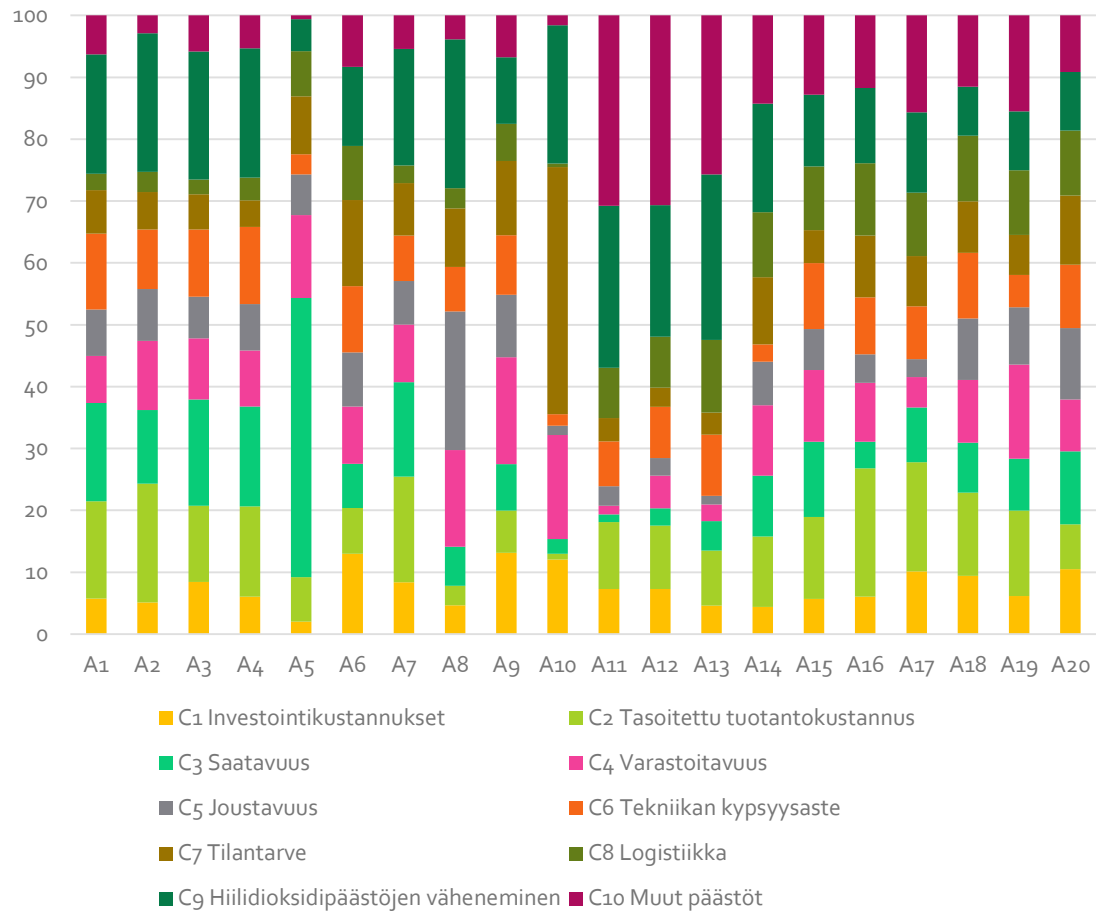


Kuva 26. Sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit (rank acceptability indices) vaihtoehdoille asiantuntijoiden arvioilla ja painoarvoilla.

Kuvassa 26 esitellään analyysissä saadut sijaluvun hyväksyttävyyssindeksit, kun otetaan huomioon asiantuntijoiden määrittämät painoarvot eri kriteereille. Tällöin kärkipäässä on A18 eli lyhytaikaislämpövarastot (35,93 %), jota seuraa A20 eli sähkökattilat (30,23 %). Sijoitukset kääntyivät siis kärjen osalta toisin päin ja muuttuivat tasaisemmiksi asiantuntijoiden antamilla painoarvoilla. Kärkeä seuraavat A9 eli biodieselin käyttö öljykattilassa (7,81 %), A15 eli maalämpöpumppu (5,72 %), A6 eli biokaasun poltto kaasukattilassa (5,36 %), A3 eli metsähakkeen poltto arinakattilassa (4,53 %) ja A7 eli puupelletin pölypolttolaitos (3,84 %). Tilanne muuttui siis asiantuntijapaneelin muodostamilla painoarvoilla hieman biopolttoaineita suosivammaksi. Viimeiselle sijalle jäi tässäkin tapauksessa A21 eli CCS-tekniiikan hyödyntäminen (94,46 %). Toiseksi viimeisen sijan suurimman hyväksyttävyyden sai myös taas A13 eli aurinkolämpölaite ilman erillistä varastoa (45,17 %).

Seuraavaksi laskettiin parivertailun voittoindeksit (*pairwise winning index*) kaikille vaihtoehtoille. Parivertailun voittoindeksi kuvaa todennäköisyyttä, jolla vaihtoehto i on suositellumpi kuin vaihtoehto k . Tätä indeksiä voidaan käyttää niiden vaihtoehtojen poistamiseen, jotka ovat selvästi muiden dominoimia. Parivertailun voittoindeksit on esitetty liitteessä 2. Tästä nähdään esimerkiksi että liitteen 2. taulukossa A2.1. ilman asiantuntijoiden painokertoimia vaihtoehto A20 eli sähkökattilat on varsin suositeltavaa kaikkiin yksittäisiin vaihtoehtoihin verrattuna. Lisäksi nähdään kuinka hyvin vaihtoehto A18 eli lyhytaikaislämpövarasto on suositeltavampi kuin muut vaihtoehdot, sen todennäköisyys olla suositeltavampi vaihtelee välillä 57 – 100 %. Liitteen 2. taulukossa A2.2. on esitetty parivertailun voittoindeksit tapauksessa, jossa asiantuntijoiden painokertoimet on otettu huomioon. Tästä nähdään esimerkiksi, että lyhytaikaislämpövarastot (A18) ovat 54,9 % todennäköisyydellä annetuilla kriteereillä ja painoarvoilla parempia kuin sähkökattilat (A20). Sitä vastoin käänteisesti verratessa sähkökattilat (A20) voittavat lyhytaikaislämpövarastot (A18) 45,1 % tapauksissa.

Tämän jälkeen muodostettiin SMAA-analyysissä keskeiset painotusvektorit, jotka on esitetty kuvissa 27 ja 28. Keskeiset painotusvektorit ilman asiantuntijoiden painoarvoja on esitetty kuvassa 27. Kuvaajasta nähdään kutakin teknologiaa parhaiten suosineet kriteerijakaumat, eli voidaan analysoida tarkemmin minkä kriteerien painottaminen suosii mitäkin teknologiaa. Esimerkiksi metsäbiomassan kaasutuksen ja polton (A5) painotuksissa eniten korostuu saatavuus, joten kriteeriä painotettaessa metsäbiomassan kaasutus nousee paremmin suositeltavaksi muihin teknologioihin verrattuna. Samalla tämä paljastaa myös, että muilla kriteereillä tarkasteltuna metsäbiomassan kaasutus ei ole tässä tapauksessa kovin suositeltavaa. Tarkempi tarkastelu aiemmista kuvaajista osoittaa myös, että sijaluvun hyväksyttävyyksindekseillä se on usein suhteellisen lähellä häntäpäätä. Kuvasta 27. nähdään myös, että aurinkolämmön vaihtoehtoilla (A11-A13) suosivia kriteereitä ovat etenkin hiilidioksidi ja muiden päästöjen väheneminen, sillä ne ovat käytössä päästöttömiä teknologioita. CCS-teknologian (A21) puuttuminen kuvaajasta johtuu siitä, että teknologialle ei löytynyt kriteereitä, jotka olisivat selvästi suosineet sen käyttöä muihin vaihtoehtoihin verrattuna.



Kuva 27. Keskeiset painotusvektorit eri tarkasteluvaihtoehdoille ilman asiantuntijoiden preferenssidataa.

Kuvassa 28. on puolestaan esitetty keskeiset painotusvektorit SMAA-analyysistä, jossa käytettiin asiantuntijoiden antamia painoarvoja kriteereille. Kuvasta nähdään, minkä kriteerien painottaminen suosii mitään teknologiaa. Esimerkiksi lyhytaikaisvarastolla varustetulla aurinkolämpölaitoksella (A12) korostuu keskeisenä kriteerinä hiilidioksidipäästöjen vähentyminen. Aurinkolämpölaitoksella ilman erillistä varastoa (A13) korostuu kriteereistä tasoitetun tuotantokustannuksen merkitys, mikä kertoo, että muiden kriteerien korostaminen heikentää sen sijoitusta. Metsäbiomassaan pohjautuvilla vaihtoehdoilla (A1-A5) korostuvat puoltavina kriteereinä saatavuus ja varastoitavuus. Vaihtoehdoille A8 ja A11 ei löytynyt keskeisiä painovektoreita.



Kuva 28. Keskeiset painotusvektorit eri tarkasteluvaihtoehdoille asiantuntijoiden painoarvot huomioiden.

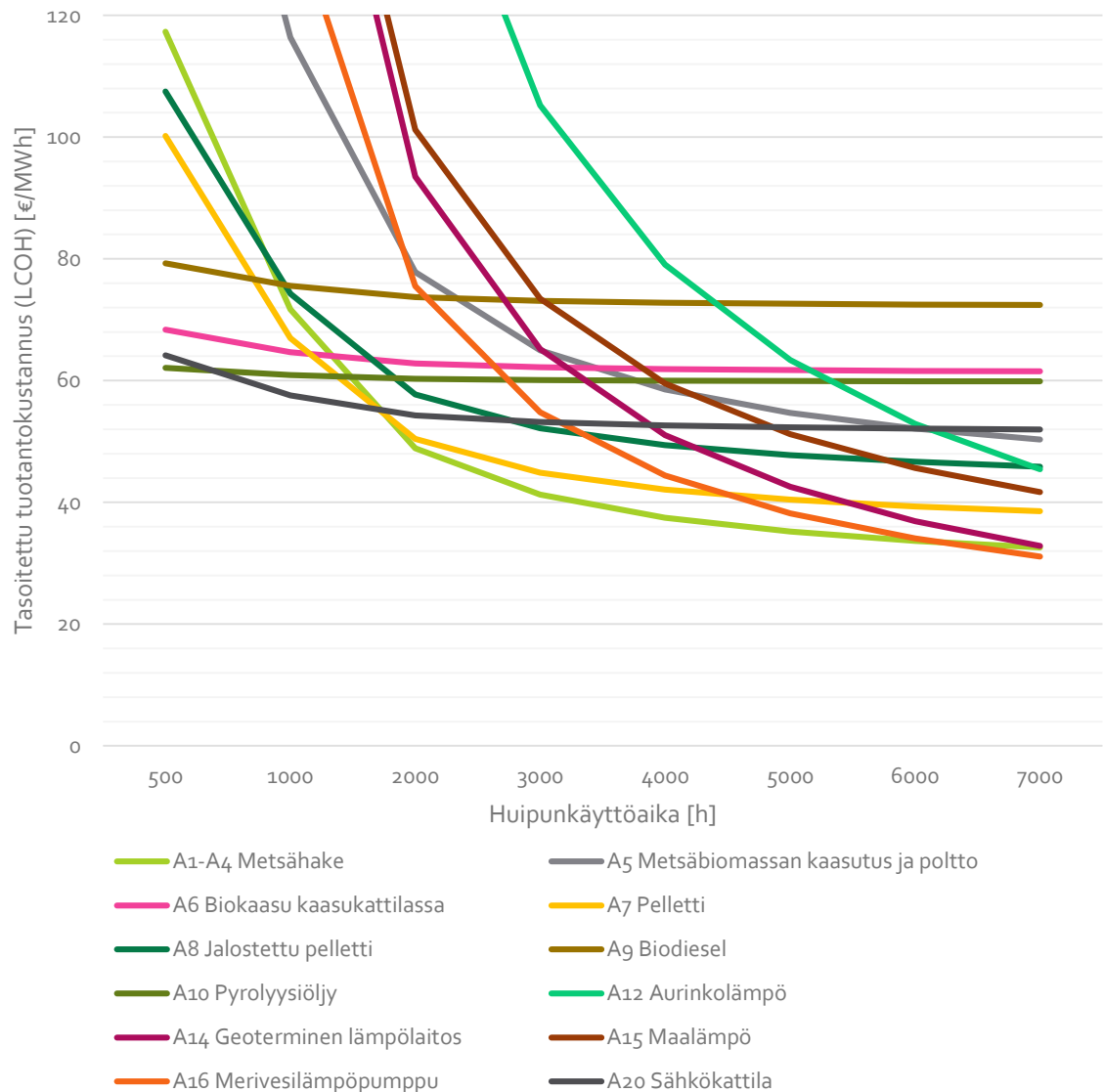
6.2 Taloudellinen vertailu

Tyypillisesti teknisten tarkastelujen lisäksi tärkeänä näkökulmana teknologioiden vertailussa on painotettu taloudellista analyysiä. Lämmöntuotantomenetelmien taloudellista vertailua voidaan tehdä tarkastelemalla teknologioiden tasoitettuja tuotantokustannuksia. Tässä työssä taloudelliseen vertailuun käytetään luvussa 4.2.2 esitettyä tasoitettujen tuotantokustannusten laskentamenetelmää, jolla voidaan verrata ominaisuuksiltaan erilaisia lämmöntuotantomuotoja toisiinsa.

6.2.1 Tasoitettu lämmöntuotantokustannus

Tasoitettujen lämmöntuotantokustannusten laskennan lähtötietoina käytettiin kirjallisuustutkimuksessa julkisista lähteistä löydettyjä tietoja. Tuotantokustannusten laskennassa käytetyt lähtöarvot ja oletukset on esitetty liitteessä 3. Näillä arvoilla ja aiemmin esitellyllä tasoitettujen tuotantokustannusten laskentamenetelmällä arvioitiin lämmön tasoitettuja tuotantokustannuksia suurelle osalle tarkastelluista lämmöntuotantomenetelmistä.

Tasoitettuja lämmöntuotantokustannuksia huipunkäyttöajan funktiona on esitetty kuvaajassa 29. Kuvan 29. arvot löytyvät myös taulukkona liitteessä 4. Laskennassa diskontauskorkokantana käytettiin 7 %. Eri tuotantolaitosten käyttöiät vaihtelivat kirjallisuustutkimuksessa löydettyjen elinkaarien arvioiden mukaan. Käytettyjen lähtöarvojen ja oletusten vaikutuksia saatuihin tuloksiin arvioidaan tarkemmin herkkyystarkasteluissa luvussa 6.3.2. Herkkyystarkasteluissa myös edellä mainittua korkoa ja käyttöikää on muutettu niiden vaikutuksen selvittämiseksi tuloksiin.



Kuva 29. Laskettuja tasoitettuja lämmöntuotantokustannuksia huipunkäyttöajan funktiona.

Tuotantokustannuslaskennan tulosten perusteella voidaan kuvaajasta 29. osoittaa taloudelliselta kannalta optimaaliset tuotantoteknologiat huippu-, vara-, keski-, ja peruskuormakäyttöön. Huippu- ja varakuormakäyttöön soveltuvat parhaiten teknologiat, jotka saavuttavat pienillä huipunkäyttöajoilla matalimmat tasoitettut tuotantokustannukset. Tällöin laitos voi seistä suurimman osan vuodesta ilman, että kiinteät kustannukset ja investointikustannusten annuiteetti vaikuttaa liiallisesti tuotantokustannuksiin. Tällaisia laitoksia

ovat tyypillisesti matalan investointikustannuksen laitokset, joita ovat muun muassa olemassa olevat laitokset, joiden investointitarve rajoittuu polttoaineen vaihtamiseen liittyviin muutostöihin.

Taloudellisen tarkastelun perusteella voidaan todeta aiemman oletuksen pätevän, sillä pienillä käyttötunneilla halvimmat tuotantoteknologiat ovat pääosin polttoaineen muutoksia biopolttoaineisiin vaihdettaessa sekä investoinniltaan edullinen sähkökattila, jonka kustannukset painottuvat myös polttoaineena käytettävään sähköön. Kuvasta 29. nähdään esimerkiksi, että huipunkäyttöajan ollessa noin 500 h, ovat tällöin tasoitetuilta tuotantokustannuksiltaan pienimpiä tuotantomuotoja sähkökattilat, pyrolyysiöljy ja biokaasu. Tosin etenkin sähkökattilan tuotantokustannukset riippuvat hyvin voimakkaasti sähkön hinnasta, jonka volatilitteetti on suuri ja tässä laskennassa on käytetty Sähkön Suomen aluehintaa talvella 2014 – 2015, joka oli kulutushuipputunnilla 49,31 €/MWh eli karkeasti pyöristettynä noin 50 €/MWh (Fingrid 2015). Pyrolyysiöljyn ja biokaasun kustannukset polttoaineina sisältävät myös kohtuullisen suuria epävarmuuksia, sillä kumpaakaan polttoainetta ei vielä ole laajalti markkinoilla Suomessa ja kustannukset perustuvat arvioihin. Jalostetun pelletin käyttö olemassa olevassa laitoksessa korvaamassa kivihiiltä sijoittuisi myös kustannuksiltaan edullisimpien teknologioiden joukkoon. Kuvassa 29 on tarkasteltu jalostetun pelletin kustannuksia rakennettaessa uusi lämpölaitos, mistä johtuen kustannukset ovat korkeat pienillä käyttötunneilla.

Huipunkäyttöajan ollessa suuri osoittautuvat suuren ominaisinvestoinnin tuotantomuodot tasoitetuilta tuotantokustannuksiltaan kannattavammiksi. Kuvasta 29. huomataan, että suurten investointien tuotantokustannukset laskevat jyrkästi huipunkäyttöajan kasvaessa, kun taas vastaavasti ominaisinvestointikustannuksiltaan pienempien tuotantomuotojen tasoitettujen tuotantokustannukset pysyvät suhteellisen tasaisina tai laskevat vain loivasti huipunkäyttöajan kasvaessa. Suurilla käyttömäärillä laskelman mukaan edullisimmiksi osoittautuivat merivesilämpöpumppulaitos, geoterminen lämpölaitos, metsähakelaitokset, pellettilaitos sekä maalämpö. Aurinkolämpö sijoittuu teoriassa hyvin suurilla käyttömäärillä, mutta rajoittuu todellisuudessa huipunkäyttöajaltaan selvästi näiden alle, sillä Suomessa aurinkolämpö voi saavuttaa optimaalisesti suunnattuna keskimäärin Helsingissä huipunkäyttöajan 900–1100 h (Vartiainen et al. 2002).

Tasoitettuja tuotantokustannuksia ei voitu laskea arviolta kaikille tuotantomuodoille, sillä osasta ei löytynyt tarpeeksi luotettavaa kustannusdataa. Esimerkiksi lämmönvarastointi ei suoranaisesti ole tuotantomenetelmä vaan tuotannon tehostus- ja optimointimenetelmä, jonka kustannukset riippuvat aina myös varastoitavan lämmön tuotantokustannuksista. Lyhytaikaislämpövaraston kustannukset ovat tapauskohtaisia riippuen muun muassa varaston koosta, varastoitavan lämmön tuotantokustannuksesta, varaston lämpöhäviöistä ja pumppauskustannuksista. Varastoinnin kannattavuus on tapauskohtaista. Varaston aiheuttamat lisäkustannukset voivat kompensoitua varaston ansiosta saavutetun lisäjouston mukanaan tuomista hyödyistä. Varastoinnin lisäämä jousto ja lämpölaitoksen ajon optimoinnin mahdollistaminen voivat tuoda enemmänkin hyötyjä kuin mikä oli varastoinnin kustannus.

Tasoitettuja tuotantokustannuksia vertailtaessa tulee ottaa huomioon, että kaukolämmön arvo on tyypillisesti eri vuodenaikoina erisuuruinen. Tuotantokustannuksia voidaan siis verrata suhteutettuna tuotantoprofiiliin. Tällöin tulee ottaa huomioon esimerkiksi aurinkolämmön tuotannon sijoittuminen pääosin kesäaikaan, jolloin kaukolämpö on halvimmillaan. Tällöin tuotetusta energiasta saadaan matalin hinta, mikäli energiaa ei voida varastoida. Toisaalta mikäli laitos voi tuottaa lämpöä huippukuorman aikana, saadaan energiasta mahdollisimman korkea hinta.

6.3 Herkkyysanalyysit ja luotettavuus

Käytettävien tutkimusmenetelmien ja niiden tulosten luotettavuutta on yleensä syytä arvioida muun muassa herkkyystarkasteluilla. Tässä kappaleessa arvioidaan ensin käytetyn SMAA-monikriteerianalyysin luotettavuutta, jonka jälkeen tutkitaan tasoitettujen tuotantokustannusvertailun tulosten herkkyyttä käytetyistä lähtöarvoista ja niiden muutoksista.

6.3.1 Monikriteerianalyysin validiteetti

Stokastisessa monikriteerisessä arvostusanalyysissä kriteerien eri painotusjakaumien vaikutukset onkin jo sisällytetty osittain analyysin tuloksiin, sillä stokastisella kriteerien painotuksella saadaan tuotua suoraan esiin eri kriteerien painottamisen vaikutuksia vaihtoehtojen järjestykseen.

Monikriteerianalyysistä saataviin tuloksiin vaikuttaa kuitenkin etenkin kriteerien valinta, ja että se on tehty noudattaen hyviä monikriteerianalyysin periaatteita, joita ovat muun muassa: (Keeney, Raiffa 1993)

- 1) Täydellisyys: kaikki tärkeät ongelman näkökulmat on otettu huomioon
- 2) Toimivuus: kriteerien joukko voidaan mitata ja käyttää merkityksellisesti analyysissä
- 3) Risteämättömyys: kahden tai useamman kriteerin ei tulisi mitata samaa asiaa
- 4) Minimaalisuus: ongelman ulottuvuudet tulisi pitää minimissä

Monikriteerivertailun tulosten luotettavuutta voitaisiin kasvattaa myös esimerkiksi käyttämällä preferenssien ja kriteerien arvojen mittaamisessa entistä laajempaa asiantuntijapaneelia (Delphi-menetelmä) tai laajempaa eri sidosryhmien preferenssejä huomioivaa kyselytutkimusta. Näiden luotettavuutta voitaisiin parantaa edelleen kyselytutkimukseen otosmäärää kasvattamalla ja varmistaen, että vastaajat omaavat tarpeeksi laajan asiantuntijuuden tai edustavat todellisuudessa hyvin nykyisiä ja tulevaisuudessa tutkittavan alueen asukkaita, mikäli kyselytutkimuksella halutaan selvittää todellisten asukkaiden preferenssejä.

Yksi mahdollisuus olisi myös tarkentaa ja laajentaa käytettyä kriteerivertailun menetelmää ja tehdä kriteerien määrittely kaikille eri tehoryhmille erikseen. Näin voitaisiin tehdä useampia monikriteerivertailuja ja etsiä eri tehoryhmiin sopivia ratkaisuja erikseen. Tällä tavoin saataisiin kaikkiin eri tehoryhmiin erikseen sopivia ratkaisuja nostettua esiin.

Tässä tehdyssä vertailussa puolestaan korostettiin erityisesti huipputuotantoon soveltuvien teknologioiden ominaisuuksia, sillä haluttiin varmistaa ja turvata lämmönsaatavuus myös huippukulutuskausina ja nykyiset erillistuotantolaitokset ovat tyypillisesti olleet tällaisessa käytössä. Mikäli halutaan tarkastella kuitenkin laajemmin kokonaislämmön-tuotantoratkaisua, olisi todennäköisesti hyvä tarkastella kaikkia tarvittavia tehoryhmiä myös tarkemmin erikseen, sillä erilaiseen käyttöön soveltuvilta laitoksilta vaaditaan kuitenkin varsin erilaisia ominaisuuksia. Esimerkiksi perustehon tuotantolaitoksen ei tarvitse olla joustava, ja sillä ympäristövaikutus korostuu enemmän, kun käyttö on jatkuvaa. Toisaalta näitä samoja kriteereitä käyttäen voidaan painottaa eri ominaisuuksia, kunhan eri tehoryhmien tarpeita tarkastellessa painokertoimet määritetään korostamaan juuri haluttuja ominaisuuksia.

6.3.2 Taloudellisten tarkastelujen herkkyyshanalyysi

Tasoitettujen tuotantokustannusten herkkyystarkasteluissa tutkittiin korkokannan, pitoajan, investoinnin, polttoaineen hinnan sekä sähkön hinnan vaikutusta eri vaihtoehtojen kannattavuuteen. Tutkittavia parametreja muutettiin yksi kerrallaan portaittain, jolloin saatiin selkeä kuva kunkin parametrin vaikuttavuudesta taloudelliseen laskelmaan.

Herkkyystarkasteluissa voidaan tarkastella käytetyn korkokannan ja käyttöiän muutosten vaikutusta tasoitettuihin tuotantokustannuksiin. Korkokantana käytettiin alkuperäisen 7 % korkokannan lisäksi vertailuna 3 % ja 9 % korkokantaa. Investointikustannusten vaikutusta tarkasteltiin muuttamalla investointikustannuksia vuoroin 10 % matalammaksi ja korkeammaksi. Polttoaineen kustannuksia muutettiin 15 % suuremmaksi ja pienemmäksi. Lisäksi tarkasteltiin 10 vuotta pidemmän käyttöiän vaikutusta. Taulukoissa 11–14 nähdään investoinnin, käyttöiän, korkokannan sekä polttoaineen hintojen muutosten vaikutus tasoitettuihin tuotantokustannuksiin eri huipunkäyttöajoilla.

Taulukoista 11–14 voidaan todeta, että esimerkiksi pyrolyysiöljyn, biodieselin ja biokaasun tapauksissa tasoitettuun tuotantokustannukseen eivät vaikuta juuri muut tekijät kuin polttoaineen hinnan muutokset. Myös sähkökattilan tapauksessa sähkön hinnan muutos vaikuttaa ylivoimaisesti eniten.

Eräässä tutkimuksessa tulevaisuuden vähähiilisestä kaukolämpöskenaarioista todettiin, että erittäin pitkäikäisissä energiainvestoinneissa nettonykyarvon korkean korkokannan käyttäminen vaikuttaa tuloksiin suuresti ja saa suurien investointien viivyttämisen näyttämään houkuttelevalta. Johtopäätöksenä oli käyttää kokokantaa 0 %, jotta tulevaisuuden olosuhteille annettaisiin suurempi painoarvo. Myös rakennusten elinikä kaukolämpöverkon käyttöikä ja geotermisen lämpölaitoksen käyttöikä vaikuttavat suuresti tuloksiin ja useiden kirjallisuuslähteiden arvioiden perusteella voidaan käyttää jopa seuraavasti: 60 vuotta rakennusten käyttöikä (50–100), 60 vuotta kaukolämpöverkon käyttöikä ja 40 vuotta lämpölaitosten käyttöikä. (Harrestrup, Svendsen 2014) Myös tästä herkkyystarkastelusta havaitaan taulukoissa 11–14, että erittäin suuren investoinnin omaavilla tekno-

logioilla suurin vaikutus tasoitettuun tuotantokustannukseen syntyy käytetyn korkokannan muutoksilla. Tällaisia teknologioita ovat esimerkiksi aurinkolämpö, geoterminen lämpölaitos, maalämpö ja merivesilämpölaitos.

Taulukko 11. Herkkyystarkastelut 500h/a huipunkäyttöajalla

| 500h/a | A1-A4 Metsähake | A5 Metsäbiomassan kaasututin | A6 Biokaasu kaasukattilassa | A7 Pelletti | A8 Jalostettu pelletti | A9 Biodiesel | A10 Pyrolyysiöljy | A12 Aurinkolämpö | A14 Geoterminen lämpölaitos | A15 Maalämpö | A16 Merivesilämpöpumppu | A20 Sähkökattila |
|---------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|------------------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|------------------|
| Vuosituotanto (GWh) | 25 | 20 | 20 | 25 | 25 | 23,5 | 140 | 0,29 | 20 | 10 | 10 | 10 |
| Inv. kust. + 0 % (€/MWh) | 117 | 115 | 68,4 | 100 | 108 | 79,3 | 62,1 | 628 | 348 | 351 | 262 | 64,2 |
| Inv. kust. +10 % (€/MWh) | 127 | 122 | 68,4 | 107 | 114 | 79,3 | 62,2 | 691 | 375 | 378 | 280 | 65,3 |
| Inv. kust. -10 % (€/MWh) | 108 | 106 | 68,4 | 93,5 | 101 | 79,3 | 62,0 | 566 | 322 | 325 | 244 | 63,1 |
| Kust. a=a+10 (€/MWh) | 104 | 106 | 68,4 | 93,5 | 101 | 79,3 | 62,0 | 585 | 322 | 325 | 236 | 62,6 |
| Kust, korko 3 % (€/MWh) | 92,3 | 88,3 | 68,4 | 79,1 | 86,4 | 79,3 | 61,7 | 406 | 264 | 267 | 213 | 61,2 |
| Kust, korko 9 % (€/MWh) | 131 | 129 | 68,4 | 112 | 119 | 79,3 | 62,3 | 752 | 395 | 398 | 289 | 65,8 |
| Kust.pa -15% (€/MWh) | 114 | 111 | 59,2 | 95,5 | 102 | 68,5 | 53,2 | 628 | 347 | 349 | 260 | 56,6 |
| Kust.pa +15% (€/MWh) | 120 | 118 | 77,5 | 105 | 113 | 90,1 | 71,1 | 628 | 349 | 354 | 264 | 71,7 |

Taulukossa 11 on esitetty eri parametrien muutoksien vaikutus eri tekniikoiden tasoitettuun tuotantokustannukseen 500 tunnin huipunkäyttöajalla. Tällä vähäisellä huipunkäyttöajalla biodiesel, pyrolyysiöljy, biokaasu sekä sähkökattila ovat tasoitetuilta tuotantokustannuksiltaan edullisimmat tuotantomenetelmät. Niitä voidaan siis suositella käytettäväksi vara- sekä huippukuormana. Tosin sähkökattilan käyttö talven kovimmilla pakkasilla voi olla rajallista, sillä sähköntuotantokapasiteettikin on tuolloin maksimissaan.

Taulukko 12. Herkkyystarkastelut 2000h/a huipunkäyttöajalla

| 2000h/a | A1-A4 Metsähake | A5 Metsäbiomassan kaasututin | A6 Biokaasu kaasukattilassa | A7 Pelletti | A8 Jalostettu pelletti | A9 Biodiesel | A10 Pyrolyysiöljy | A12 Aurinkolämpö | A14 Geoterminen lämpölaitos | A15 Maalämpö | A16 Merivesilämpöpumppu | A20 Sähkökatilla |
|---------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|------------------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|------------------|
| Vuosituotanto (GWh) | 100 | 80 | 80 | 100 | 100 | 94 | 560 | 1,142 | 80 | 40 | 40 | 40 |
| Inv. kust. + 0 % (€/MWh) | 48,9 | 46,9 | 62,8 | 50,4 | 57,7 | 73,7 | 60,3 | 157,5 | 93,5 | 101,2 | 75,5 | 54,3 |
| Inv. kust. +10 % (€/MWh) | 51,2 | 48,9 | 62,8 | 52,1 | 59,4 | 73,7 | 60,3 | 173,2 | 100,1 | 107,9 | 80,0 | 54,6 |
| Inv. kust. -10 % (€/MWh) | 46,6 | 44,8 | 62,8 | 48,7 | 56,1 | 73,7 | 60,3 | 141,8 | 86,8 | 94,6 | 71,0 | 54,0 |
| Kust. a=a+10 (€/MWh) | 45,5 | 44,8 | 62,8 | 48,7 | 56,1 | 73,7 | 60,3 | 146,7 | 86,9 | 94,6 | 68,9 | 53,9 |
| Kust, korko 3 % (€/MWh) | 42,6 | 40,3 | 62,8 | 45,1 | 52,4 | 73,7 | 60,2 | 101,9 | 72,4 | 80,1 | 63,1 | 53,5 |
| Kust, korko 9 % (€/MWh) | 52,3 | 50,5 | 62,8 | 53,3 | 60,6 | 73,7 | 60,3 | 188,4 | 105,1 | 112,9 | 82,3 | 54,7 |
| Kust.pa -15% (€/MWh) | 45,8 | 43,6 | 53,7 | 45,7 | 51,9 | 62,9 | 51,3 | 157,5 | 92,2 | 98,5 | 73,5 | 46,7 |
| Kust.pa +15% (€/MWh) | 52,0 | 50,2 | 72,0 | 55,1 | 63,5 | 84,5 | 69,2 | 157,5 | 94,8 | 103,9 | 77,5 | 61,9 |

Taulukossa 12 on esitetty eri parametrien muutoksien vaikutus eri tekniikoiden tasoitettuun tuotantokustannukseen 2000 tunnin huipunkäyttöajalla. Tällä huipunkäyttöajalla tuotantokustannuksiltaan edullisinta teknologiaa on vaikeampi määrittää, sillä tilanne on tasaisempi. Lähes kaikki teknologiat saavuttavat saman suuruusluokan tuotantokustannukset pois lukien alkuinvestointi-intensiiviset teknologiat, kuten aurinkolämpö, geoterminen lämpölaitos sekä maalämpö. Tässä teholuokassa voidaan siis käyttää monipuolisesti erilaisia teknologioita.

Taulukko 13. Herkkyystarkastelut 4000h/a huipunkäyttöajalla

| 4000h/a | A1-A4 Metsähake | A5 Metsäbiomassan kaasututin | A6 Biokaasu kaasukattilassa | A7 Pelletti | A8 Jalostettu pelletti | A9 Biodiesel | A10 Pyrolyysiöljy | A12 Aurinkolämpö | A14 Geoterminen lämpölaitos | A15 Maalämpö | A16 Merivesilämpöpumppu | A20 Sähkökatilla |
|--|-----------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|------------------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|------------------|
| Vuosi- tuotanto (GWh) | 200 | 160 | 160 | 200 | 200 | 188 | 1120 | 2,283 | 160 | 80 | 80 | 80 |
| Inv. kust. + 0 % (€/MWh) | 37,5 | 35,6 | 61,9 | 42,1 | 49,4 | 72,8 | 60,0 | 79,1 | 51,1 | 59,5 | 44,4 | 52,6 |
| Inv. kust. +10 % (€/MWh) | 38,6 | 36,6 | 61,9 | 42,9 | 50,2 | 72,8 | 60,0 | 86,9 | 54,4 | 62,9 | 46,7 | 52,8 |
| Inv. kust. -10 % (€/MWh) | 36,3 | 34,5 | 61,9 | 41,3 | 48,6 | 72,8 | 60,0 | 71,2 | 47,7 | 56,2 | 42,2 | 52,5 |
| Kust. a=a+10 (€/MWh) | 35,8 | 34,5 | 61,9 | 41,3 | 48,6 | 72,8 | 60,0 | 73,6 | 47,7 | 56,2 | 41,1 | 52,4 |
| Kust, korko 3 % (€/MWh) | 34,3 | 32,3 | 61,9 | 39,5 | 46,8 | 72,8 | 59,9 | 51,2 | 40,5 | 49,0 | 38,2 | 52,3 |
| Kust, korko 9 % (€/MWh) | 39,2 | 37,4 | 61,9 | 43,6 | 50,9 | 72,8 | 60,0 | 94,5 | 56,9 | 65,4 | 47,8 | 52,9 |
| Kust.pa -15% (€/MWh) | 34,4 | 32,3 | 52,8 | 37,4 | 43,7 | 62,0 | 51,0 | 79,1 | 49,8 | 56,9 | 42,4 | 45,1 |
| Kust.pa +15% (€/MWh) | 40,6 | 38,9 | 71,1 | 46,8 | 55,2 | 83,6 | 68,9 | 79,1 | 52,3 | 62,2 | 46,4 | 60,2 |

Taulukossa 13 on esitetty eri parametrien muutoksien vaikutus eri tekniikoiden tasoitettuun tuotantokustannukseen 4000 tunnin huipunkäyttöajalla. Tällä huipunkäyttöajalla biomassalaitoksia sekä merivesilämpöpumppuja voidaan pitää kustannustehokkaimpina. Tällä huipunkäyttöajalla myös geoterminen lämpölaitos sekä jalostettu pelletti lähestyvät kustannustehokkaimpia teknologioita.

Taulukko 14. Herkkyystarkastelut 6000h/a huipunkäyttöajalla

| 6000h/a | A1-A4 Metsähake | A5 Metsäbiomassan kaasututin | A6 Biokaasu kaasukatilassa | A7 Pelletti | A8 Jalostettu pelletti | A9 Biodiesel | A10 Pyrolyysiöljy | A12 Aurinkolämpö | A14 Geotermien lämpöaitos | A15 Maalämpö | A16 Merivesilämpöpumppu | A20 Sähkökatila |
|----------------------------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|-------------|------------------------|--------------|-------------------|------------------|---------------------------|--------------|-------------------------|-----------------|
| Vuosituotanto (GWh) | 300 | 240 | 240 | 300 | 300 | 282 | 1680 | 3,43 | 240 | 120 | 120 | 120 |
| Inv. kust.+ 0 % (€/MWh) | 33,7 | 31,8 | 61,6 | 39,3 | 46,7 | 72,5 | 59,9 | 52,9 | 36,9 | 45,6 | 34,1 | 52,1 |
| Inv. kust.+10 % (€/MWh) | 34,4 | 32,5 | 61,6 | 39,9 | 47,2 | 72,5 | 59,9 | 58,1 | 39,1 | 47,9 | 35,6 | 52,2 |
| Inv. kust. - 10 % (€/MWh) | 32,9 | 31,1 | 61,6 | 38,8 | 46,1 | 72,5 | 59,9 | 47,7 | 34,7 | 43,4 | 32,6 | 52,0 |
| Kust. a=a+10 (€/MWh) | 32,6 | 31,1 | 61,6 | 38,8 | 46,1 | 72,5 | 59,9 | 49,3 | 34,7 | 43,4 | 31,9 | 52,0 |
| Kust, korko 3 % (€/MWh) | 31,6 | 29,6 | 61,6 | 37,6 | 44,9 | 72,5 | 59,9 | 34,3 | 29,9 | 38,6 | 29,9 | 51,9 |
| Kust, korko 9 % (€/MWh) | 34,8 | 33,0 | 61,6 | 40,3 | 47,6 | 72,5 | 59,9 | 63,2 | 40,8 | 49,5 | 36,3 | 52,2 |
| Kust.pa - 15% (€/MWh) | 30,6 | 28,5 | 52,5 | 34,7 | 40,9 | 61,7 | 50,9 | 52,9 | 35,6 | 43,0 | 32,1 | 44,5 |
| Kust.pa +15% (€/MWh) | 36,8 | 35,1 | 70,8 | 44,0 | 52,4 | 83,3 | 68,8 | 52,9 | 38,2 | 48,3 | 36,1 | 59,7 |

Taulukossa 14 on esitetty eri parametrien muutoksien vaikutus eri tekniikoiden tasoitettuun tuotantokustannukseen 6000 tunnin huipunkäyttöajalla. Tällä huipunkäyttöajalla geotermien lämpö sekä merivesilämpöpumput ovat saavuttaneet biomassalaitokset ja päätyneet kustannustehokkaimmiksi teknologioiksi. Kuten 4000h/a käytöllä, myös biomassalaitoksia, geotermistä lämpöä sekä merivesilämpöpumppuja voidaan pitää kustannustehokkaimpina keski- ja peruskuormateknologioina.

7 Tulosten tarkastelu ja pohdinta

Tässä luvussa tarkastellaan ja pohditaan saatuja tuloksia. Ensin tarkastellaan ja pohditaan monikriteerivertailun ja tuotantokustannusvertailun tulosten perusteella eri teknologioiden potentiaalia ja rajoitteita. Tämän jälkeen saatujen tulosten perusteella pohditaan hiilineutraalien tuotantoteknologioiden jakautumista eri tehoryhmiin mahdollisessa tulevaisuuden hiilineutraalissa tuotantorakenteessa. Lopuksi tulosten perusteella tehdään johtopäätöksiä ja jatkotutkimusehdotuksia.

7.1 Tekniikoiden potentiaalit ja rajoitteet

Edellä on vertailtu eri teknologisia vaihtoehtoja eri kriteerien ja menetelmien avulla. Tässä kootaan yhteen ja analysoidaan mitä eri menetelmillä saadut tulokset voisivat tarkoittaa käytännössä eri tehoryhmien ja kokonaistuotantorakenteen kannalta. Vertailun tuloksia voidaan pohtia monikriteerianalyttisen vertailun perusteella sekä eri vaihtoehtojen taloudellisia puolia ja tasoitettuja lämmön tuotantokustannuksia vertailemalla. Kokonaistuotantorakenteen kannalta on olennaista koko lämmöntarpeen kattaminen luotettavasti ja kaikkiin tehoryhmiin sopivien ratkaisujen löytäminen.

Kun energianlähteiden tuotantokapasiteetti on rajallinen, järjestelmän täytyy hyödyntää kokonaisuudessaan useampia eri energianlähteitä. Esimerkiksi Aalborgin kunnalle laaditussa skenaariossa Ostergaardin et al (2010) tutkimuksessa todettiin, että voidaan suunnitella pelkästään uusiutuvaan energiaan perustuva järjestelmä kustannuksilla, jotka ovat verrattavissa perinteiseen fossiilisia polttoaineita hyödyntävään malliin. Järjestelmän kustannusrakenne oli kuitenkin huomattavan erilainen, sillä suurin osa kustannuksista painottui investointeihin eikä polttoaineisiin. Toisaalta uusiutuvien energiajärjestelmien etuna havaittiin myönteinen paikallinen työllisyysvaikutus. (Alberg Østergaard et al. 2010)

Asiantuntijapaneelin arvioiden sekä Monte Carlo-simuloinnilla tehdyn SMAA-analyysin perusteella voidaan päätellä, että esimerkiksi investointikustannusten korostaminen teknologioiden vertailussa puoltaa voimakkaasti teknologioita, jotka edellyttävät mahdollisimman pieniä investointikustannuksia. Näitä teknologioita ovat pääosin biopolttoaineiden vaihtoon perustuvat tuotantovaihtoehdot, kuten biokaasu, bioöljy, pelletti sekä pyrolyysiöljy. Toisaalta tasoitettuja tuotantokustannuksia vertailtaessa kustannukset riippuvat aina oletetusta huipunkäyttöajasta.

Saatavuuden korostaminen suosii erityisesti metsäbiomassan käyttöä lämmöntuotannossa. Myös erilaiset metsähakkeen kaasutus- ja polttomenetelmät sekä sähkökattilat sijoittuvat paremmin saatavuutta korostettaessa. Varastoitavuutta korostettaessa puollettiin esimerkiksi nestemäisiä polttoaineita ja jalostettua pellettiä. Vastaavasti mikäli joustavuus koettiin tärkeäksi, päätyi jalostettu pelletti, sähkökattila ja kausilämpövarastot keskimäärin paremmille sijoituksille. Tekniikan kypsyysasteen osalta on vaikea tehdä johtopäätöksiä muuten kuin siltä osin, että tällä hetkellä vasta kehitysasteella olevat teknologiat, kuten geotermien lämpölaitos sekä pyrolyysiöljy sijoittuvat keskimäärin huonosti

kyseistä kriteeriä painotettaessa, mutta kehitysnopeutta tulevaisuudessa on vaikea ennustaa ja joidenkin teknologioiden kehitys voi olla nopeaakin riippuen monista eri tekijöistä.

Tilantarpeenkin osalta tilanne on tasainen, mutta huonosti tällä kriteerillä suoriutuviksi lämmöntuotantoteknologioiksi osoittautuivat metsähakelaitokset, aurinkolämpölaitokset sekä maalämpöpumppulaitos. Logistiikan korostaminen suosi vastaavasti lämpöpumppulaitoksien, sähkökattiloiden sekä aurinkolämpölaitosten valintaa. Hiilidioksidipäästöjen vähenemisen koettiin korostavan biomassaa käyttävien teknologioiden sekä aurinkolämpölaitosten sijoitusta. Muiden päästöjen korostaminen näkyi erityisesti aurinkolämpölaitosten sijoituksessa.

Teknologian valinnassa on tärkeää ottaa huomioon myös teknologioiden rajoitukset tuotantotehon potentiaalin suhteen. Aurinkolämmön tuotantomahdollisuudet ovat rajallisia talvella ja biomassaa ei ole kestävästi rajattomia määriä käytettävissä ja biomassan käytölle voi ilmaantua myös kilpailevia kohteita. Siispä tarvitaankin todennäköisemmin useampia eri teknologioita täyttämään kokonaislämmöntuotantarpeen.

7.2 Yhteenveto tekniikan soveltuvuudesta eri tehoryhmiin

Kirjallisuustutkimuksella eri tekniikasta kerättyjen tietojen perusteella sekä vertailuista ja kustannuksia laskemalla voidaan päätellä millä tavalla eri hiilineutraalit lämmöntuotantoteknologiat soveltuvat lämmöntuotantorakenteen eri tehoryhmiin, jotka esiteltiin luvussa 2.1. Näiden perusteella voidaan todeta, mitkä teknologisista vaihtoehtoista soveltuvat oletettavasti parhaiten huippu- ja varatuotantokapasiteetin täyttämiseen ja mitkä soveltuvat pikemminkin perustehon tuotantoon. Taulukossa 14. on esitetty tämän analyysin tulokset, josta nähdään millä tavalla hiilineutraalit lämmöntuotantoteknologiat jakautuivat soveltuvuudeltaan tuotantorakenteen eri tehoryhmiin.

Taulukko 15. Hiilineutraalien energianlähteiden ja tuotantotekniikoiden soveltuvuus eri tehoryhmiin.

| Perusteho | Keskiteho |
|-----------------------------------|----------------------------|
| - Geoterminen lämpö | - Kiinteät biopolttoaineet |
| - Aurinkolämpö varastolla | - Biokaasut |
| - Kiinteät biopolttoaineet | - Sähkökattilat |
| - Lämpöpumput eri lämmönlähteillä | |
| Huipputeho | Varateho |
| - Bioöljyt | - Bioöljyt |
| - Biokaasut | - Biokaasut |
| - Sähkökattilat | - Sähkökattilat |
| - Lämpövarastot | |

Taulukon 15. luokittelun perusteella voidaan todeta, että itse asiassa suurin osa erilaisista hiilineutraaleista lämmöntuotantoteknologioista soveltuu parhaiten perustehon tuotantoon. Tämä johtuu siitä, että monet uusiutuvista energianlähteistä edellyttävät merkittäviä pääomainvestointeja ja tällaisten tuotantomuotojen on kannattavinta olla tuotantokäytössä mahdollisimman paljon. Näissä tekniikoissa tuotantotehoa ei voi tai ei kannata säätää, vaan on kannattavinta tuottaa täydellä teholla. Nykyisessä järjestelmässä ja nykyisille tekniikalla nämä tuotantomuodot soveltuvat siis parhaiten perustehon tuotantoon. Toisaalta lämmönvarastointitekniikoiden kehittyminen voisi parantaa hyödyntämismahdollisuuksia huomattavasti, etenkin jos lämpöä pystyttäisiin varastoimaan kannattavasti pitkiä aikoja kausivarastoissa. Tällöin voitaisiin tuottaa lämmityskauden ulkopuolella ylimäärin lämpöä varastoon niin, että varastoitu lämpömäärä riittäisi kattamaan lämmityskauden lämmöntarpeen.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta myös, että etenkin huipputehon ja varatehon tuotantoryhmissä on soveltuvina tuotantovaihtoehtoina vain biopolttoaineita ja sähkökattilat. Lisäksi huippu- ja varatehon tuotantotarve voitaisiin korvata jossain määrin myös lämmönvarastoinnilla. Näiden tekniikoiden sijoittuminen näihin tehoryhmiin johtuu siitä, että näillä tehoryhmillä on vähemmän käyttötunteja, ja näin ollen investointikustannusten tulisi olla mahdollisimman alhaiset, jotta tasoitettu lämmöntuotantokustannus ei kasvaisi suhteettoman suureksi. Alhaisimmat investointikustannukset ovat yksinkertaisimmalla perinteisellä tekniikalla, kuten perinteisillä lämpökattiloilla. Aurinkolämmön tuotantotekniikkakin on verrattain yksinkertaista ja voisi olla suhteellisen edullista, mutta aurinkolämmön vuodenaikainen saatavuus on epäsuotuisasti ristiriidassa näiden suurempien lämpötehontarpeen ajankohtien kanssa. Lisäksi näiltä keski- huippu- ja varatehon tuotantomuodoilta vaaditaan hyvää joustavuutta, nopeaa säädettävyyttä sekä erittäin hyvää käyttö- ja toimintavarmuutta.

7.3 Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen johtopäätöksinä voidaan todeta, että kaukolämmön tuotanto hiilidioksidineutraaleilla teknologioilla voi muuttaa perinteistä kaukolämmön tuotantorakennetta, mikä tuo mukanaan teknologisia ja taloudellisia haasteita. Muutoksia voidaan kuitenkin toteuttaa, kunhan huomioidaan erilaisten teknologioiden vaikutukset kaukolämpöjärjestelmään ja eri teknologioiden rajoitteet, jotta kaukolämpöjärjestelmäratkaisu voidaan kokonaisuudessaan suunnitella järkevästi.

Kuten monikriteerivertailun tuloksista havaittiin, monet hiilineutraalit pelkän lämmön tuotantomenetelmät eivät sovellu suoraan korvaamaan nykyisessä huippu- ja varatehon tuotannossa käytettyä lämmön erillistuotantoa. Huomattavaa joustavuutta vaadittavaan huippu- ja varatehon tuotantoon soveltuvat tarkastelun perusteella lämpövarastot, sähkökattilat ja energiatiheämmät jalostetut biopolttoaineet, joita voidaan varastoida helposti. Hyvin suuren lämmöntarpeen vuodenaikaisvaihtelun takia huomattava määrä huippukulutuskauden tehokapasiteettia ja polttolaitoksia tarvitaan todennäköisesti tulevaisuudessakin.

Mikäli sähkön käyttö lisääntyy lämmöntuotannossa, tarvitaan todennäköisesti lisää huippu-putuotantokapasiteettia myös sähköntuotantoon. Kokonaiskuvassa voidaan nähdä tämä myös huipputehon tuotannon tarpeen siirtämisenä toisalle. Tällöin lämmön huipputehon tarpeen aikana käytetään enemmän sähköä, jonka tuotannossa joudutaan käyttämään entistä enemmän huippu-putuotantokapasiteettia, joka on tyypillisesti lauhdesähköä. Tällöin energiasysteemin kokonaisenergiatehokkuus kärsii. Voikin olla kokonaisuuden kannalta järkevää sijoittaa huipputehon tuotantoon tarvittavaa, polttotekniikkaa hyödyntävää, tekniikkaa lämmöntuotantoon. Lämmöntuotannossa polttamalla saavutetaan merkittävästi korkeampi hyötysuhde, jolloin koko järjestelmän hyötysuhde on korkeampi.

Talven huippukulutuksen aikana sähkön ja lämmön tarve ovat usein samanaikaisesti huippulukemissa. Tällöin huippu-putuotannossa olisi järkevää käyttää CHP-laitoksia, sillä tällöin molempien energiamuotojen huipputehontarve saataisiin tyydytettyä yhdellä laitoksella ja mahdollisimman korkealla hyötysuhteella. Lisäksi korkean hyötysuhteen seurauksena CHP-laitos saattaisi olla energia- ja kustannustehokkuudeltaan paras vaihtoehto, sillä vaikka pelkkää lämpöä voidaan tuottaa hyvällä hyötysuhteella myös muilla teknologioilla, on pelkän sähköntuotannon hyötysuhde alhaisempi. Tästä syystä sähkön ja lämmön yhteistuotanto huippu-putuotannossa voi olla kokonaistaloudellisesti ajatellen energia- ja kustannustehokkaampaa, mikäli molempien huippukulutustarve osuu samaan ajankohtaan.

Tutkimuksen perusteella näyttää siltä, että biopolttoaineita kannattaa nykyisellään käyttää etenkin lämmön huippu- ja varatehontarpeen tuotannossa, sillä ne ovat kaikista tarkastelluista teknologioista harvoja nykyisiä potentiaalisia selkeästi joustavia hiilineutraaleita lämmöntuotantovaihtoehtoja. Myös lämpövarastojen käytöllä voidaan rajallisesti korvata osa tehokapasiteetista, mutta niiden lataus täyttyy myös tuottaa olemassa olevalla kapasiteetilla. Lisäksi sähkökattilat näyttäisivät tutkimuksen perusteella olevan potentiaalisia lämmön huippu-putuotannossa, sillä ne osoittautuivat useimmilta ominaisuuksiltaan erittäin hyvin valituilla kriteereillä vertailussa pärjääviksi. Sähkökattilat olisivat potentiaalisia etenkin siinä tapauksessa, että hiilineutraalisti tuotettua sähköä olisi runsaasti tarjolla esimerkiksi tuuli- tai vesivoiman ylituotantona. Toinen mahdollisuus olisi CCS-tekniikan kehittyminen, niin että fossiilisiakin polttoaineita voitaisiin hyödyntää hiilineutraalisti huippu- tai varatehon tarvittaessa. Näillä näkymin tämän tekniikan kehitys vaatii kuitenkin vielä paljon tutkimus- ja kehitystyötä ennen kuin se voi tulla kaupallisesti kannattavaksi.

Tutkimuksen perusteella voidaan huomata, että monet hyvin investointi-intensiiviset hiilineutraalit teknologiat ovat nykytekniikalla kannattavimpia jatkuvassa käytössä, mikä ei kuitenkaan nykytekniikalla ole aina mahdollista, esimerkiksi aurinkolämmön käyttö ympärivuotisesti. Näiden hyödyntämismahdollisuuksia voisi kuitenkin lisätä huomattavasti pitkäaikaisen lämmönvarastointitekniikan kehittyminen, joka todetaan myös hiilidioksidineutraalin lämmöntuotannon kehittämisessä olevaksi avaintekijäksi.

Näin ollen tämän vertailevan tutkimuksen keskeinen esiin noussut seikka hiilineutraalien kaukolämmön tuotantojärjestelmien suunnittelussa on etenkin lämpövarastojen korostunut merkitys. Lyhytaikaislämpövarastot soveltuvat tutkimuksen perusteella käytettäviksi varsin hyvin jo nykytekniikalla kaikilla eri preferensseillä ja eri tilanteissa. Lisäksi etenkin pitkäaikaisen lämmönvarastoinnin kehittyminen teknisesti ja taloudellisesti kannattavaksi mahdollistaisi huomattavan hiilineutraalien tuotantomuotojen lisäysmahdollisuuden. Tekniikan kehittämisessä edesauttaisi myös etenkin varastointilantarpeen pienentyminen uudempia lämmönvarastointitekniikoita kehittämällä.

7.4 Jatkotutkimusehdotukset

Jatkotutkimusta hiilidioksidineutraaleista lämmöntuotantoteknologioista tarvitaan selvästi vielä lisää, sillä aihe on jäänyt huomattavan vähälle huomiolle kansainvälisen energian tuotannon tutkimuksen keskittyessä pääosin ratkaisemaan sähköenergiantuotantoon liittyviä kysymyksiä. Lämmöntarpeella onkin sähköntarpeeseen verrattuna pienempi merkitys globaalilla mittakaavalla, mutta lämmöntuotannon merkitys korostuu etenkin Suomen kaltaisissa kylmissä maissa, joissa lämpöenergia muodostaa suuren osa energiankulutuksesta ja kaukolämmitys on myös ollut pitkään käytössä. Aihetta onkin tutkittu tarkemmin lähinnä Pohjoismaissa, etenkin Tanskassa ja Ruotsissa. Nyt kuitenkin myös Suomessa pyrittäessä luopumaan hiilestä polttoaineena sekä muiden fossiilisten polttoaineiden käyttöä vähennettäessä, on vasta herännyt huomattava tarve tutkia muita lämmöntuotantovaihtoehtoja.

Jatkotutkimusta tarvitaan etenkin CHP-tuotannon hyödyntämisestä hiilineutraalissa lämmön ja sähkön huipputuotannossa. Samanaikaisten lämmön ja sähkön kulutushuippujen sattuessa hiilineutraaleilla pien-CHP-tekniikoilla voitaisiin vastata äkilliseen kysyntään energiatehokkaasti. Lisäksi olisi hyvä tutkia tarkemmin erilaisia eri tuotantotekniikkoihin perustuvia pienemmän ja keskiluokan CHP-tekniikoita, sillä tutkimuksen ja kehityksen alla on monia erilaisia teknisiä ratkaisuvaihtoehtoja.

Keskeistä olisi myös tutkia enemmän etenkin lämmön pitkäaikaisvarastointimahdollisuuksia, sillä ne ovat avainasemassa etenkin uusiutuvan energian tuotannon lisäämisessä. Uusiutuvilla energialähteillä saatavuus ei yleensä ole tasaista tai vastaa suoraan kulutuksen tarvetta, joten merkittävä ja lähes ainoa keino paikallisissa energiajärjestelmissä niiden osuuden kasvattamisen suuremmaksi on lisätä järjestelmän joustoa varastoinnilla. Etenkin pitkäaikaisen ja kausivarastoinnin jatkotutkimus ja -kehitys olisi tärkeää joustamattomien tuotantomuotojen käytön edistämiseksi.

Jatkotutkimuksessa olisi hyvä tutkia myös erilaisia lämmön, sähkön, jäähdytyksen ja polttoaineiden yhteistuotannon vaihtoehtoja. Miten erilaisia yhteistuotantomenetelmiä voitaisiin tulevaisuudessa kehittää hyödyntämään entistä paremmin eri tuotantomuotojen yhdistämisen synergioita ja parantamaan energiatehokkuutta. Jatkossa olisi hyvä tutkia myös, miten esimerkiksi lämmöntuotantolaitoksia voitaisiin hyödyntää myös lämmityskauden tai huippukulutuskausien ulkopuolella esimerkiksi polttoaineiden tuotannossa.

Jatkotutkimuksissa hiilineutraalien kaukolämmön tuotantotekniikoiden tarkastelua voitaisiin laajentaa myös muihin laajempiin näkökulmiin ottaen huomioon teknisten, taloudellisten ja ympäristövaikutuksellisten tekijöiden lisäksi laajemmin myös sosiaaliset ja poliittiset näkökulmat, joilla on myös vaikutuksensa eri teknologioiden leviämiseen, kehittymiseen ja hyödyntämismahdollisuuksiin etenkin kaupunkiympäristöissä.

Vaikka tässä tutkimuksessa keskityttiin pääosin vain lämmöntuotantoon, jonka hyötysuhteet ja energiatehokkuus ovat varsin hyviä, ei kannata kuitenkaan unohtaa yhteiskunnan energiajärjestelmien laajempaa kokonaiskuva. Jatkotutkimuksen kannalta olisi hyvä laajentaa tutkimusta kaikkiin energiajärjestelmiin ja huomioda tutkimuksessa yhdyskuntien energiajärjestelmät kokonaisuuksina, jotta eri järjestelmien väliset yhteistuotannon hyödyt voitaisiin huomioda. Sähkö-, lämpö- ja jäähdytysverkkojen lisäksi muu yhteiskunnan infrastruktuuri, kuten maakaasuverkko, tieverkko, ja viemäriverkko, olisi syytä ottaa enemmän huomioon ja hyödyntää mahdollisia synergioita suunnittelussa.

8 Yhteenveto

Tässä diplomityössä on tarkasteltu, miten uusiutuvia energianlähteitä voitaisiin hyödyntää kaukolämmön erillistuotannossa ottaen huomioon kaupunkiympäristön asettamat vaatimukset sekä Suomen ilmastolliset ja maantieteelliset rajoitteet. Koska lämpöenergian tuotanto on globaalisti selvästi pienemmässä roolissa sähköntuotantoon verraten, ei uusiutuvan ja hiilineutraalin energian kansainvälisessä tutkimuksessa ole keskitytty merkittävästi lämmöntuotantoon.

Ensin on esitelty kaukolämmön toimintaperiaatteet lyhyesti sekä erillislämmön tuotannon rooli nykytilanteessa, jotta ymmärretään kaukolämmön tuotantorakenne ja se ympäristö, johon hiilineutraalien ratkaisujen soveltuvuutta tarkastellaan. Tässä esittelyssä on tuotu esiin erillislämmön tuotannon perinteisiä ominaispiirteitä sekä lämmöntuotannon reuna-ehtoja, joiden mukaan toimitaan.

Tutkimuksessa selvitettiin useiden eri hiilineutraalien teknologioiden saatavuutta, tekniikkaa ja ominaisuuksia kirjallisuustutkimuksen avulla. Tutkittavia hiilineutraaleita teknologioita olivat erilaiset biopolttoaineet ja niiden polttotekniikat, aurinkolämpö, geotermiinen lämpö, lämpöpumppujen käyttö hyödyntäen erilaisia ympäristön ja hukkalämmön lähteitä, sähkökattilat uusiutuvaa sähköä hyödyntäen ja CCS-teknologialla hiilidioksidin talteenotto. Lisäksi tutkittiin myös lämmön varastointitekniikoiden mahdollisuuksia tuotannon korvaamisessa.

Tämän jälkeen esiteltiin tarkasteltavan kaupungin ympäristö ja kaukolämpöjärjestelmä, jossa teknologioiden soveltuvuutta tutkittiin, sekä tutkimuksessa käytettyjä menetelmiä. Tutkimuksessa käytetyt menetelmät olivat SMAA-monikriteerianalyysimenetelmä ja taositettujen lämmöntuotantokustannusten laskenta ja vertailu.

Olennaiset soveltuvuuteen vaikuttavat tekijät ja rajoitteet identifioitiin seuraavaksi tarkasteltavassa ympäristössä. Tekniseen soveltuvuuteen todettiin vaikuttavan tilantarve, tekniikan käyttövarmuus eli myös polttoaineen tai energianlähteen saatavuus, polttoaineen tai energian varastoitavuus, tekniikan toimintavarmuus eli luotettavuus, käytön joustavuus, ja tekniikan ympäristövaikutukset. Lisäksi taloudelliseen soveltuvuuteen vaikuttavat etenkin investointi- ja lämmöntuotantokustannukset sekä kaukolämmön hintakehitys ja näihin kaikkiin edellä mainittuihin vaikuttavat myös poliittiset ja lainsäädännölliset tekijät.

Tekniikoiden soveltuvuutta vertailtiin monikriteerianalyttisesti käyttäen stokastista monikriteeristä arvostusanalyysiä. Tässä analyysissä määritettiin ensin tarkasteltavat vaihtoehdot ja käytettävät kriteerit, jotka määritettiin kaukolämmön tuotantojärjestelmän kokonaistoimivuutta korostaen. Teknologioiden arviointiin määritetyillä kriteereillä käytettiin asiantuntijapaneelia, jolta kerättiin myös preferenssidataa kriteerien painoarvoista. Tämän jälkeen analyysi suoritettiin tässä tutkimuksessa tehdyllä Excel-taulukkolaskentaohjelmatyökalulla sekä tarkastettiin SMAA-ohjelmatyökalulla Monte Carlo -simulointia käyttäen, jossa tehtiin noin 10 000 simulointikierrosta erilaisten preferenssien vaikutusten

esille tuomiseksi teknologioiden vertailussa. Vertailussa korkeimman ensimmäisen sijan hyväksyttävyyden saivat sähkökattilat ja toisen lyhytaikaislämpövarastot ilman asiantuntijoiden painoarvoja. Analyysin tulos muuttui vain vähän asiantuntijoiden painoarvoja käyttäen nostaen lyhytaikaisvarastot ensimmäiselle sijalle sähkökattiloiden seurattessa toisena. Sähkökattiloita ja lämpövarastoja voidaankin pitää kiinnostavina tulevaisuuden teknologioina kulutuksen ja tuotannon yhteensovittamisessa.

Teknologioiden taloudellisia edellytyksiä tarkasteltiin vertailemalla tasoitettuja tuotantokustannuksia huipunkäyttöajan funktiona. Tasoitettuja tuotantokustannuksia arvioitiin laskemalla elinkaarenaikaiset kustannukset yhteen tuotettua energiayksikköä kohti, sekä diskonttaamalla kassavirrat nykyhetkeen. Tuloksia vertailemalla voitiin todeta, että eri tuotantovaihtoehtojen kustannusrakenteet poikkesivat toisistaan huomattavasti. Biopolttoaineisiin perustuvat tuotantomuodot olivat tuotantokustannuksiltaan tasaisempia myös pienellä huipunkäyttöajalla, kun taas suuria pääomainvestointeja edellyttävät teknologiat olivat tasoitetuilta tuotantokustannuksiltaan kohtuullisia suurilla huipunkäyttöajoilla, jolloin pienet tai kokonaan puuttuvat polttoainekustannukset korostuivat.

Tulosten tarkastelussa tehtiin myös herkkyystarkasteluja tuotantokustannusvertailulle sekä tarkasteltiin kriteerianalyysin validiteettia. Tuotantokustannusten herkkyystarkasteluissa havaittiin, että etenkin polttoaineiden kustannusvaihtelut vaikuttavat merkittävästi biopolttoaineisiin perustuvien teknologioiden tasoitettuun lämmöntuotantokustannukseen. Investointikeskeisillä teknologioilla merkittävin vaikutus oli puolestaan käytetyllä korkokannalla.

Johtopäätöksinä tästä tutkimuksesta voidaan todeta, että hiilineutraaliin energiantuotantoon ei ole yhtä yksittäistä teknologista ratkaisua, vaan tulevaisuudessakin lämmöntuotantopaletti tulee koostumaan todennäköisimmin useasta eri tuotantoteknologiasta. Lisäksi todettiin investointikustannuksen, polttoaineen sekä sähkön hinnan vaihteluiden aiheuttavan merkittävää epävarmuutta teknologioiden kannattavuuden arviointiin tulevaisuudessa. Pitkälle tulevaisuuteen suuntautuviin teknis-taloudellisiin tarkasteluihin vaikuttavat useat eri tekijät ja eri teknologioiden kehityssuuntia on vaikea ennustaa.

Jatkotutkimusehdotuksina esitettiin useita tutkimustarpeita, kuten pien-CHP-laitosten tutkimista huipputuotantokäytössä. Lisäksi kaukolämmön lyhyt- ja pitkäaikaisvarastointimenetelmiä olisi hyvä tutkia, jotta uusiutuvien ja hiilineutraalien lämmöntuotantomenetelmien hyödyntämismahdollisuuksia voitaisiin lisätä energian varastointimahdollisuuden seurauksena. Pitkäaikaisvarastointi mahdollistaisi entistä laajemman hiilineutraalien ja uusiutuvien energianlähteiden käytön lisäämisen lämmöntuotannossa.

Lähdeluettelo

ALAKANGAS, E., 2000. *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. Espoo: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT) ISBN 951-38-5740-9.

ALANEN, R., KOLJONEN, T., HUKARI, S. and SAARI, P., 2003. *Energian varastoinnin nykytila*. Espoo: VTT.

ALBERG ØSTERGAARD, P., MATHIESEN, B.V., MÖLLER, B. and LUND, H., 2010. A renewable energy scenario for Aalborg Municipality based on low-temperature geothermal heat, wind power and biomass. *Energy*, 12, vol. 35, no. 12, s. 4892-4901 ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.energy.2010.08.041>.

ARANDA, G., VAN DER DRIFT, A. and SMIT, R., 2014. *The Economy of Large Scale Biomass to Substitute Natural Gas (bioSNG) plants*. ECN (Energy research Centre of the Netherlands), Tammikuu 2014.

ARHA, I., 2015. *Kotimaan referenssien merkitys yrityksen kasvu- ja vientiponnisteluille*. Vantaa: Savo-Solar, 5.3.2015.

Babcock & Wilcox Enterprises Inc., 2015. *XCL-S Low NOx Oil and Gas Burner*. Babcock & Wilcox Enterprises Inc. Saatavissa: <http://www.babcock.com/products/Pages/XCL-S-Low-NOx-Oil-and-Gas-Burner.aspx>.

BACH, B., WERLING, J. and OMMEN, T.S., 2014. *Integration of heat pumps in greater copenhagen*. Master's thesis ed. Technical University of Denmark, 28.3.2014,.

BADGER, P., BADGER, S., PUETTMANN, M., STEELE, P. and COOPER, J., 2010. Techno-economic analysis: Preliminary assessment of pyrolysis oil production costs and material energy balance associated with a transportable fast pyrolysis system. *BioResources*, vol. 6, no. 1, s. 34-47.

BAIK, Y., KIM, M., CHANG, K., LEE, Y. and RA, H., 2014. Potential to enhance performance of seawater-source heat pump by series operation. *Renewable Energy*, 5, vol. 65, s. 236-244 ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.renene.2013.09.021>.

BARRAS, R., 2009. *Building cycles : growth & instability*. Chichester, West Sussex, U.K. : Ames, Iowa : Wiley-Blackwell.

BASU, P., 2013. Chapter 3 - Biomass Characteristics. In: P. BASU ed., *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Second Edition)* Boston: Academic Press, s. 47-86 ISBN 9780123964885. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/B978-0-12-396488-5.00003-4>.

BECKERS, K.F., LUKAWSKI, M.Z., ANDERSON, B.J., MOORE, M.C. and TESTER, J.W., 2014. Levelized costs of electricity and direct-use heat from Enhanced Geothermal Systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 6, no. 1, s. 013141. Saatavissa: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jrse/6/1/10.1063/1.4865575> DOI <http://dx.doi.org/10.1063/1.4865575>.

BISWAS, A.K., YANG, W. and BLASIAK, W., 2011. Steam pretreatment of Salix to upgrade biomass fuel for wood pellet production. *Fuel Processing Technology*, 9, vol. 92, no. 9, s. 1711-1717 ISSN 0378-3820. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.fuproc.2011.04.017>.

BROBERG, S., BACKLUND, S., KARLSSON, M. and THOLLANDER, P., 2012. Industrial excess heat deliveries to Swedish district heating networks: Drop it like it's hot. *Energy Policy*, 12, vol. 51, no. 0, s. 332-339 ISSN 0301-4215. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.enpol.2012.08.031>.

CAVALLARO, F., 2009. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, 7, vol. 34, no. 7, s. 1678-1685 ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.renene.2008.12.034>.

CHAMORRO, C.R., GARCÍA-CUESTA, J.L., MONDÉJAR, M.E. and PÉREZ-MADRAZO, A., 2014. Enhanced geothermal systems in Europe: An estimation and comparison of the technical and sustainable potentials. *Energy*, 2/1, vol. 65, no. 0, s. 250-263 ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.energy.2013.11.078>.

CONNOLLY, D., LUND, H., MATHIESEN, B.V., WERNER, S., MÖLLER, B., PERSSON, U., BOERMANS, T., TRIER, D., ØSTERGAARD, P.A. and NIELSEN, S., 2014. Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. *Energy Policy*, 2, vol. 65, s. 475-489 ISSN 0301-4215. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.enpol.2013.10.035>.

DALLA ROSA, A. and CHRISTENSEN, J.E., 2011. Low-energy district heating in energy-efficient building areas. *Energy*, 12, vol. 36, no. 12, s. 6890-6899 ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.energy.2011.10.001>.

Danish Ministry of Climate and Energy., 2011. *Energy Strategy 2050 - from coal, oil and gas to green energy*. Copenhagen, Denmark: Danish Energy Agency, February 2011 ISBN 978-87-92727-14-5.

EDENHOFER, O., PICHS-MADRUGA, R., SOKONA, Y., SEYBOTH, K., MATSCHOSS, P., KADNER, S., ZWICKEL, T., EICKEMEIER, P., HANSEN, G., SCHLÖMER, S. and VON STECHOW, C., 2011. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds) ed., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press,.

Energi Styrelsen., 2012. *Technology Data for Energy Plants: Generation of Electricity and District Heating, Energy Storage and Energy Carrier Generation and Conversion*. Tanska: Energi Styrelsen, Maaliskuu 2012 ISBN 978-87-7844-931-3.

Energiateollisuus ry., 2015a. *Energiavuosi 2014 Kaukolämpö*. Energiateollisuus ry, 21.1.2015.

Energiateollisuus ry., 2015b. *Kaukolämmön hinnat tyyppitaloissa eri paikkakunnilla*. Energiateollisuus ry, 11.02.2015.

Energiateollisuus ry., 2014. *Kaukolämpötilasto 2013*. Energiateollisuus ry ISBN ISSN 0786-4809.

Euroopan komissio., 2011. *Energy Roadmap 2050 - KOM(2011) 885*. Bryssel: Euroopan komissio, 15.12.2011.

Euroopan parlamentti ja neuvosto., 2010. *2010/75/EU*. Direktiivi ed. EU, 24.11.2010, ISBN L334/17.

Fingrid., 2015. *Sähköjärjestelmän toiminta talven 2014 - 2015 kulutushuipputilanteessa*. Fingrid, 5.3.2015.

FLYNN, C. and SIRÉN, K., 2015. Influence of location and design on the performance of a solar district heating system equipped with borehole seasonal storage. *Renewable Energy*, 9, vol. 81, no. 0, s. 377-388 ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org.lib-proxy.aalto.fi/10.1016/j.renene.2015.03.036>.

FOEX Indexes Ltd., 2015. *PIX Pellet Nordic Index*. FOEX Indexes Ltd. 18.05.2015, Saatavissa: <http://www.foex.fi/biomass/>.

FREDERIKSEN, S. and WERNER, S., 2013. *District heating and cooling*. Lund: Studentlitteratur AB ISBN 978-91-44-08530-2 (hft.).

GADD, H. and WERNER, S., 2015. 18 - Thermal energy storage systems for district heating and cooling. In: L.F. CABEZA ed., *Advances in Thermal Energy Storage Systems* Woodhead Publishing, s. 467-478 ISBN 9781782420880. DOI <http://dx.doi.org.lib-proxy.aalto.fi/10.1533/9781782420965.4.467>.

GHAFGHAZI, S., SOWLATI, T., SOKHANSANJ, S. and MELIN, S., 2010a. A multicriteria approach to evaluate district heating system options. *Applied Energy*, 4, vol. 87, no. 4, s. 1134-1140 ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org.lib-proxy.aalto.fi/10.1016/j.apenergy.2009.06.021>.

GHAFGHAZI, S., SOWLATI, T., SOKHANSANJ, S. and MELIN, S., 2010b. Techno-economic analysis of renewable energy source options for a district heating project. *International Journal of Energy Research*, vol. 34, no. 12, s. 1109-1120 ISSN 1099-114X. DOI 10.1002/er.1637.

GIANCOLI, D.C., WHATLEY, K.M., BECK, J.A., BENNHOLD, C. and FELDMAN, G., 2005. *Physics : principles with applications : Giancoli : sixth edition*. Upper Saddle River (N.J.) : Pearson ISBN 0-13-035251-9.

HAKKARAINEN, T., TSUPARI, E., HAKKARAINEN, E. and IKÄHEIMO, J., 2015. *The role and opportunities for solar energy in Finland and Europe*. Espoo: VTT ISBN 978-951-38-8236-5.

HARRESTRUP, M. and SVENDSEN, S., 2014. Heat planning for fossil-fuel-free district heating areas with extensive end-use heat savings: A case study of the Copenhagen district heating area in Denmark. *Energy Policy*, 5, vol. 68, no. 0, s. 294-305 ISSN 0301-4215. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.enpol.2014.01.031>.

HEDEGAARD, K., 2014. *Heat Planning for the Greater Copenhagen Area*. Copenhagen, Denmark; <http://www.varmeplanhovedstaden.dk/english>: Ea Energy Analyses, November 17, 2014.

Helen Oy., 2015. *Vuosikertomus 2014*. Helen Oy.

HOEKMAN, S.K., BROCH, A., ROBBINS, C., CENICEROS, E. and NATARAJAN, M., 2012. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1, vol. 16, no. 1, s. 143-169 ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.rser.2011.07.143>.

HUCULAK, M., JARCZEWSKI, W. and DEJ, M., 2015. Economic aspects of the use of deep geothermal heat in district heating in Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, vol. 49, no. 0, s. 29-40 ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.rser.2015.04.057>.

IEA., 2014. *Key World Energy Statistics 2014*. Paris, France: International Energy Agency.

IPCC., 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. The Core Writing Team, Rajendra K. Pachauri, Leo Meyer ed., Geneva, Switzerland: IPCC.

JALOVAARA, J., AHO, J., HIETAMÄKI, E. and HYYTIÄ, H., 2003. *Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus (SYKE), 15.8.2003 ISBN ISSN 1238-7312.

JIANDONG, Z., HANZHONG, T. and SUSU, C., 2015. Numerical simulation for structural parameters of flat-plate solar collector. *Solar Energy*, 7, vol. 117, no. 0, s. 192-202 ISSN 0038-092X. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.solener.2015.04.027>.

KALOGIROU, S.A., 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, no. 3, s. 231-295 ISSN 0360-1285. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.

KÄRKI, J., TSUPARI, E. and ARASTO, A., 2013. CCS Feasibility Improvement in Industrial and Municipal Applications by Heat Utilisation. *Energy Procedia*, vol. 37, s. 2611-2621 ISSN 1876-6102. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.145>.

KEENEY, R.L. and RAIFFA, H., 1993. *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge university press.

KOSKELAINEN, L., SAARELA, R. and SIPILÄ, K., 2006. *Kaukolämmön käsikirja*. A. NUORKIVI ed., Helsinki: Energiatieteiden tutkimuskeskus ISBN 952-5615-08-1 (nid.).

KUOSA, M., KONTU, K., MÄKILÄ, T., LAMPINEN, M. and LAHDELMA, R., 2013. Static study of traditional and ring networks and the use of mass flow control in district heating applications. *Applied Thermal Engineering*, 5/30, vol. 54, no. 2, s. 450-459 ISSN 1359-4311. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.018>.

LAHDELMA, R., HOKKANEN, J. and SALMINEN, P., 1998. SMAA - Stochastic multiobjective acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 4/1, vol. 106, no. 1, s. 137-143 ISSN 0377-2217. DOI [http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/S0377-2217\(97\)00163-X](http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/S0377-2217(97)00163-X).

LAHDELMA, R. and SALMINEN, P., 2001. SMAA-2: Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis for Group Decision Making. *Operations Research*, 06/01; 2015/11, vol. 49, no. 3, s. 444-454 ISSN 0030-364X. DOI 10.1287/opre.49.3.444.11220.

LAHTINEN, P., 2013. *Aurinkolämmön liiketoimintamahdollisuudet kaukolämmön yhteydessä Suomessa*. Pöyry Oy, 14.05.2013.

LAITILA, J., LEINONEN, A., FLYKTMAN, M. and VIRKKUNEN, M., 2010. *Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet*. [Tiedotteita – Research Notes 2564]. VTT ISBN 978-951-38-7678-4.

LAUKKANEN, J. and NAUMOV, G., 2013. *Nokian kaupunki - Kolmenkulman energiaratkaisu loppuraportti*. Pöyry Oy, 25.11.2013.

LUND, H., MÖLLER, B., MATHIESEN, B.V. and DYRELUND, A., 2010. The role of district heating in future renewable energy systems. *Energy*, 3, vol. 35, no. 3, s. 1381-1390 ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.energy.2009.11.023>.

LUND, H., WERNER, S., WILTSHIRE, R., SVENDSEN, S., THORSEN, J.E., HVELPLUND, F. and MATHIESEN, B.V., 2014. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 4/15, vol. 68, no. 0, s. 1-11 ISSN 0360-5442. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.energy.2014.02.089>.

Luonnonvarakeskus., 2015. *Suomen metsävaratietoja ja suurin kestävä hakkuukertymä-arvio vuosille 2011–2040, Taulukkoliite*. Luonnonvarakeskus, 18.03.2015.

MUSTAFA OMER, A., 2008. Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2, vol. 12, no. 2, s. 344-371 ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.rser.2006.10.003>.

NASA., 2015. *NASA Surface meteorology and Solar Energy - Available Tables*. Paul W. Stackhouse, Jr., Ph.D. ed., Atmospheric Science Data Center: NASA. 22.05.2015, Saatavissa: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=206151&lat=60&submit=Submit&hgt=100&veg=17&sitelev=&email=skip@larc.nasa.gov&p=grid_id&step=2&lon=25.

NATARAJAN, K., LEDUC, S., PELKONEN, P., TOMPPONEN, E. and DOTZAUER, E., 2014. Optimal locations for second generation Fischer Tropsch biodiesel production in Finland. *Renewable Energy*, 2, vol. 62, no. 0, s. 319-330 ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.renene.2013.07.013>.

Neste Oy., 2015. *Biodiesel prices (SME & FAME)*. 28.09.2015, Saatavissa: <https://www.neste.com/fi/en/neste-oil/investors/market-data/biodiesel-prices-sme-fame>.

NEWELL, R.G. and PIZER, W.A., 2004. Uncertain discount rates in climate policy analysis. *Energy Policy*, 3, vol. 32, no. 4, s. 519-529 ISSN 0301-4215. DOI [http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/S0301-4215\(03\)00153-8](http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/S0301-4215(03)00153-8).

ØSTERGAARD, P.A. and LUND, H., 2011. A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. *Applied Energy*, 2, vol. 88, no. 2, s. 479-487 ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.apenergy.2010.03.018>.

PARADIS, P., ROUSSE, D.R., HALLÉ, S., LAMARCHE, L. and QUESADA, G., 2015. Thermal modeling of evacuated tube solar air collectors. *Solar Energy*, 5, vol. 115, no. 0, s. 708-721 ISSN 0038-092X. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.solener.2015.03.040>.

PAULUS, C. and PAPILLON, P., 2014. Substations for Decentralized Solar District Heating: Design, Performance and Energy Cost. *Energy Procedia*, vol. 48, no. 0, s. 1076-1085 ISSN 1876-6102. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.egypro.2014.02.122>.

PERSSON, U. and WERNER, S., 2011. Heat distribution and the future competitiveness of district heating. *Applied Energy*, 3, vol. 88, no. 3, s. 568-576 ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.020>.

PESOLA, A., BRÖCKL, M. and VANHANEN, J., 2011. *Älykäs kaukolämpöjärjestelmä ja sen mahdollisuudet*. Gaia Consulting Oy, 8.11.2011.

PINTO, F., ANDRÉ, R.N. and GULYURTLU, I., 2010. *Stages of deployment of syngas cleaning technologies*. New York: Nova Science Publishers, Inc.

PIRHONEN, I., HERÄJÄRVI, H., SAUKKOLA, P., RÄTY, T. and VERKASALO, E., 2011. *Puutuotteiden kierrätys - Finnish Wood Research Oy:n osarahoittaman esiselvityshankkeen loppuraportti*. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos ISBN 978-951-40-2284-5 (PDF).

RABL, A., 1985. *Active solar collectors and their applications* /. New York : Oxford University Press.

RACKLEY, S.A., 2010. Chapter 2 - Overview of Carbon Capture and Storage. In: S.A. RACKLEY ed., *Carbon Capture and Storage* Boston: Butterworth-Heinemann, s. 19-28 ISBN 9781856176361. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-85617-636-1.00002-X>.

RUBIN, E.S., DAVISON, J.E. and HERZOG, H.J., 2015. The cost of CO2 capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 9, vol. 40, s. 378-400 ISSN 1750-5836. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.018>.

SAARNO, T., NIEMI, R. and ROTH, M., 2015. *Geotermisen energian tuotanto*. St1 Deep Heat Oy, 20.01.2015.

SCHMIDT, T., MANGOLD, D. and MÜLLER-STEINHAGEN, H., 2004. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany. *Solar Energy*, 0, vol. 76, no. 1-3, s.

165-174 ISSN 0038-092X. DOI <http://dx.doi.org.lib-proxy.aalto.fi/10.1016/j.solener.2003.07.025>.

SHORT, W., PACKY, D.J. and HOLT, T., 2005. *A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies*. University Press of the Pacific.

Suomen Kaasuyhdistys., 2014. *Maakaasukäskirja*. Helsinki: Suomen Kaasuyhdistys ry, Finnish Gas Association, 02/2014.

Suomen ympäristökeskus., 2001. *Finnish Expert Report on Best Available Technologies in Large Combustion Plants*. Finnish Environment Institute ed., Helsinki: Edita Oyj ISBN 1238-7312/952-11-0861-4.

TAHKOKORPI, M., HAGSTRÖM, M. and VANHANEN, J., 2011. *Aurinkolämmön mahdollisuudet kaukolämpöjärjestelmässä*. Gaia Consulting Oy, 08.11.2011.

TERVONEN, T. and LAHDELMA, R., 2007. Implementing stochastic multicriteria acceptability analysis. *European Journal of Operational Research*, 4/16, vol. 178, no. 2, s. 500-513 ISSN 0377-2217. DOI <http://dx.doi.org.lib-proxy.aalto.fi/10.1016/j.ejor.2005.12.037>.

The Scottish Government., 2008. *Scotland's Renewable Strategy: Recommendations to Scottish Ministers Renewable Heat Group (RHG) Report 2008*. Edinburgh: The Scottish Government, February, 2008 ISBN 978-0-7559-5633-3.

The Scottish Government., 2015. *Heat Policy Statement - Towards Decarbonising Heat: Maximising the Opportunities for Scotland*. Edinburgh: The Scottish Government, June 2015 ISBN 978-1-78544-440-1.

Tilastokeskus., 2015. *Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus, 4. vuosineljännes 2014, Liitekuvio 14. Energian loppukäyttö sektoreittain 2014**. Helsinki: Tilastokeskus, 23.01.2015 ISBN ISSN=1799-795X.

VAN DER STELT, M.J.C., GERHAUSER, H., KIEL, J.H.A. and PTASINSKI, K.J., 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 9, s. 3748-3762 SCOPUS.

VARTIAINEN, E., LUOMA, P., HILTUNEN, J. and VANHANEN, J., 2002. *Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO₂-päästöt*. Helsinki: Gaia Group Oy, 15.3.2002 ISBN ISBN 952-91-4465-2.

WANG, J., JING, Y., ZHANG, C. and ZHAO, J., 2009. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, vol. 13, no. 9, s. 2263-2278 ISSN 1364-0321. DOI <http://dx.doi.org.lib-proxy.aalto.fi/10.1016/j.rser.2009.06.021>.

XU, J., WANG, R.Z. and LI, Y., 2014. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy*, 5, vol. 103, no. 0, s. 610-638 ISSN 0038-092X. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.solener.2013.06.006>.

ZHEN, L., LIN, D.M., SHU, H.W., JIANG, S. and ZHU, Y.X., 2007. District cooling and heating with seawater as heat source and sink in Dalian, China. *Renewable Energy*, 12, vol. 32, no. 15, s. 2603-2616 ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.renene.2006.12.015>.

Liiteluettelo

Liite 1. Monikriteerianalyysin asiantuntijapaneelin keskiarvot ja keskihajonnat. 2 sivua.

Liite 2. Monikriteerianalyysin parivertailun tulokset. 2 sivua.

Liite 3. Tasoitetussa tuotantokustannuslaskennassa käytetyt lähtöarvot. 1 sivu.

Liite 4. Tasoitettuja tuotantokustannuksia. 1 sivu.

Liite 1. Monikriteerianalyysin asiantuntijapaneelin keskiarvot ja keskihajonnat

Taulukko A1.1. Asiantuntijapaneelin keskiarvot SMAA-monikriteerianalyysissä.

| Kriteerit | | Talous | | Tekniset | | | | Ympäristö | | | |
|---------------------|--|--------|------|----------|------|------|------|-----------|------|------|------|
| Tuotantovaihtoehdot | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
| A1 | Metsähakkeen poltto leijupetikattilassa | 5,40 | 3,60 | 2,70 | 4,60 | 3,50 | 1,20 | 4,60 | 6,90 | 2,60 | 4,90 |
| A2 | Metsähake-monipolttoaine leijupetikattilassa | 6,20 | 3,90 | 2,80 | 4,80 | 3,70 | 1,60 | 5,00 | 7,10 | 2,80 | 5,10 |
| A3 | Metsähakkeen poltto arinakattilassa | 4,40 | 3,60 | 2,70 | 4,60 | 3,70 | 1,30 | 4,70 | 6,90 | 2,50 | 5,00 |
| A4 | Metsähake-monipolttoaine arinakattilassa | 4,90 | 3,90 | 2,70 | 4,70 | 3,80 | 1,40 | 5,20 | 7,00 | 2,60 | 5,10 |
| A5 | Metsäbiomassan terminen kaasutus ja poltto kaasukattilassa | 6,70 | 5,10 | 2,70 | 4,70 | 4,40 | 3,50 | 5,20 | 6,50 | 3,00 | 4,30 |
| A6 | Biokaasun poltto kaasukattilassa (tuotu muualta kaasuverkossa) | 3,50 | 5,60 | 4,90 | 4,30 | 2,10 | 2,00 | 1,60 | 2,30 | 3,20 | 3,70 |
| A7 | Puupelletin pölypolttolaitos | 4,00 | 4,10 | 2,60 | 3,80 | 2,90 | 2,10 | 3,40 | 5,30 | 3,00 | 4,60 |
| A8 | Jalostetun pelletin (torrefioitu/höyry) pölypolttolaitos | 5,00 | 5,30 | 5,60 | 3,40 | 3,10 | 4,60 | 3,10 | 4,90 | 3,50 | 4,80 |
| A9 | Biodieselin käyttö öljykattilassa | 2,70 | 6,20 | 4,20 | 2,40 | 1,80 | 1,70 | 2,00 | 3,50 | 3,90 | 3,80 |
| A10 | Pyrolyysiöljyn käyttö öljykattilassa (retrofit) | 4,22 | 6,44 | 5,44 | 4,56 | 2,67 | 4,33 | 2,89 | 3,33 | 3,78 | 4,56 |
| A11 | Aurinkolämpölaitos ja maanalainen kausivarasto | 7,10 | 5,50 | 5,90 | 6,00 | 5,40 | 3,50 | 7,30 | 1,40 | 3,10 | 1,80 |
| A12 | Aurinkolämpölaitos ja lyhytaikaislämpövarasto | 6,30 | 4,80 | 7,50 | 6,70 | 6,00 | 2,70 | 6,80 | 1,20 | 2,70 | 1,90 |
| A13 | Aurinkolämpölaitos ilman erillistä varastoa | 5,90 | 4,90 | 8,20 | 8,90 | 8,90 | 2,20 | 6,80 | 1,20 | 2,90 | 1,90 |
| A14 | Geoterminen lämpölaitos (syvälämpö 6-7 km) | 7,50 | 4,40 | 3,90 | 3,90 | 4,50 | 8,40 | 3,00 | 1,20 | 2,60 | 1,30 |
| A15 | Maalämpöpumppu porakaivokentällä | 5,44 | 3,56 | 2,78 | 3,67 | 4,00 | 1,67 | 5,00 | 1,33 | 3,44 | 1,89 |
| A16 | Merivesilämpöpumppulaitos | 6,00 | 4,20 | 5,10 | 4,50 | 4,60 | 2,00 | 3,80 | 1,40 | 4,00 | 2,00 |
| A17 | Matalan lämpötilan ylijäämälämpö, lämpöpumppu | 4,40 | 3,90 | 4,60 | 6,40 | 7,00 | 2,50 | 3,40 | 1,70 | 3,60 | 2,00 |
| A18 | Lyhytaikaislämpövarasto (vesisäiliöt) | 3,50 | 3,22 | 3,80 | 3,40 | 2,00 | 1,20 | 3,60 | 1,20 | 4,50 | 1,90 |
| A19 | Kausilämpövarastot (maaperä/kalliovarasto) | 5,50 | 3,90 | 4,30 | 3,20 | 2,70 | 3,80 | 4,60 | 1,30 | 4,60 | 2,00 |
| A20 | Sähkökattilat (hiilineutraali sähkö) | 2,78 | 5,78 | 2,00 | 4,33 | 1,22 | 1,33 | 2,11 | 1,22 | 3,78 | 2,89 |
| A21 | CCS-teknologia hyödynnettynä olemassa olevissa laitoksissa | 9,00 | 8,60 | 6,60 | 6,90 | 6,20 | 8,70 | 7,20 | 5,10 | 4,40 | 4,00 |
| | | | | | | | | | | | |
| | Kriteerien tärkeys ja vaikuttavuusjärjestys | 3,33 | 1,67 | 2,78 | 4,22 | 3,89 | 4,33 | 6,33 | 7,00 | 4,11 | 5,89 |

Taulukko A1.2. Asiantuntijapaneelin keskihajonnat SMAA-monikriteerianalyyssissä.

| Kriteerit | | Talous | | Tekniset | | | | Ympäristö | | | |
|---------------------|--|--------|------|----------|------|------|------|-----------|------|------|------|
| Tuotantovaihtoehdot | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
| A1 | Metsähakkeen poltto leijupetikattilassa | 0,94 | 0,96 | 1,33 | 2,15 | 1,41 | 0,42 | 1,62 | 0,94 | 1,33 | 2,35 |
| A2 | Metsähake-monipolttoaine leijupetikattilassa | 1,52 | 1,31 | 1,03 | 1,89 | 1,29 | 0,96 | 1,75 | 0,96 | 1,26 | 2,17 |
| A3 | Metsähakkeen poltto arinakattilassa | 1,17 | 1,26 | 1,33 | 2,15 | 1,59 | 0,42 | 1,45 | 0,94 | 1,40 | 2,26 |
| A4 | Metsähake-monipolttoaine arinakattilassa | 1,33 | 1,62 | 1,33 | 2,02 | 1,56 | 0,67 | 1,42 | 0,83 | 1,33 | 2,17 |
| A5 | Metsäbiomassan terminen kaasutus ja poltto kaasukattilassa | 1,34 | 2,02 | 1,33 | 1,66 | 0,92 | 1,57 | 1,63 | 1,66 | 1,23 | 1,57 |
| A6 | Biokaasun poltto kaasukattilassa (tuotu muualta kaasuverkossa) | 2,77 | 1,63 | 2,54 | 2,01 | 0,57 | 2,18 | 0,67 | 1,71 | 1,70 | 2,23 |
| A7 | Puupelletin pölypolttolaitos | 0,99 | 1,31 | 0,57 | 0,74 | 0,82 | 0,74 | 1,07 | 1,26 | 1,31 | 1,85 |
| A8 | Jalostetun pelletin (torrefioitu/höyry) pölypolttolaitos | 1,63 | 1,73 | 2,53 | 1,50 | 1,03 | 2,01 | 0,79 | 1,37 | 1,47 | 1,79 |
| A9 | Biodieselin käyttö öljykattilassa | 1,41 | 2,02 | 1,83 | 1,50 | 0,63 | 1,23 | 0,67 | 1,49 | 2,01 | 1,25 |
| A10 | Pyrolyysiöljyn käyttö öljykattilassa (retrofit) | 1,80 | 1,36 | 2,12 | 2,69 | 1,30 | 1,71 | 1,22 | 1,00 | 1,41 | 1,83 |
| A11 | Aurinkolämpölaitos ja maanalainen kausivarasto | 1,10 | 2,40 | 1,55 | 2,02 | 1,91 | 1,57 | 0,63 | 0,68 | 2,00 | 1,85 |
| A12 | Aurinkolämpölaitos ja lyhytaikaislämpövarasto | 1,49 | 2,59 | 0,83 | 1,41 | 2,31 | 1,73 | 1,26 | 0,42 | 1,79 | 2,16 |
| A13 | Aurinkolämpölaitos ilman erillistä varastoa | 2,17 | 2,94 | 0,94 | 0,31 | 0,31 | 1,63 | 1,57 | 0,42 | 1,85 | 2,16 |
| A14 | Geoterminen lämpölaitos (syvälämpö 6-7 km) | 1,63 | 2,25 | 2,31 | 2,64 | 2,69 | 0,67 | 1,31 | 0,42 | 2,04 | 0,47 |
| A15 | Maalämpöpumppu porakaivokentällä | 1,56 | 1,32 | 1,00 | 1,90 | 2,06 | 1,30 | 1,41 | 0,48 | 1,73 | 0,83 |
| A16 | Merivesilämpöpumppulaitos | 1,83 | 1,95 | 1,25 | 2,26 | 1,63 | 1,20 | 1,23 | 0,68 | 1,52 | 0,99 |
| A17 | Matalan lämpötilan ylijäämälämpö, lämpöpumppu | 1,89 | 1,66 | 1,79 | 1,55 | 1,73 | 1,63 | 1,49 | 0,92 | 1,83 | 1,29 |
| A18 | Lyhytaikaislämpövarasto (vesisäiliöt) | 1,87 | 2,00 | 1,56 | 1,41 | 1,10 | 0,42 | 1,94 | 0,42 | 2,08 | 1,33 |
| A19 | Kausilämpövarastot (maaperä/kalliovarasto) | 1,56 | 1,37 | 2,06 | 1,64 | 1,37 | 2,18 | 1,79 | 0,47 | 2,26 | 1,20 |
| A20 | Sähkökattilat (hiilineutraali sähkö) | 1,62 | 2,12 | 1,58 | 2,35 | 0,43 | 0,70 | 0,97 | 0,43 | 2,89 | 2,09 |
| A21 | CCS-teknologia hyödynnettynä olemassa olevissa laitoksissa | 0,00 | 0,68 | 2,87 | 1,63 | 1,70 | 0,67 | 1,29 | 2,21 | 3,09 | 2,04 |
| | | | | | | | | | | | |
| | Kriteerien tärkeys ja vaikuttavuusjärjestys | 3,46 | 0,83 | 1,39 | 2,91 | 1,92 | 2,77 | 2,06 | 2,93 | 1,71 | 1,39 |

Liite 2. Monikriteerianalyysin parivertailun tulokset

Taulukko A2.1. Parivertailun voittoindeksit (%) vaihtoehtoille SMAA-analyysissä. Todennäköisyys, että rivissä oleva vaihtoehto on parempi kuin sarakkeessa oleva.

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 | A15 | A16 | A17 | A18 | A19 | A20 | A21 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| A1 | 0,0 | 72,6 | 45,7 | 60,8 | 85,5 | 21,5 | 20,2 | 66,6 | 15,8 | 61,6 | 78,6 | 76,2 | 85,3 | 52,9 | 17,3 | 41,1 | 49,5 | 7,1 | 33,3 | 7,4 | 99,4 |
| A2 | 27,4 | 0,0 | 25,0 | 37,0 | 71,0 | 12,9 | 8,3 | 50,7 | 8,9 | 46,7 | 68,9 | 65,6 | 78,7 | 42,0 | 8,2 | 27,3 | 36,3 | 3,4 | 21,4 | 3,7 | 99,1 |
| A3 | 54,3 | 75,1 | 0,0 | 64,1 | 86,5 | 23,7 | 24,4 | 68,8 | 17,1 | 63,6 | 79,4 | 77,2 | 86,3 | 54,5 | 20,1 | 43,6 | 52,5 | 8,4 | 36,5 | 8,2 | 99,4 |
| A4 | 39,2 | 63,0 | 35,9 | 0,0 | 79,5 | 17,7 | 14,2 | 59,5 | 12,0 | 54,2 | 74,4 | 72,1 | 82,5 | 48,2 | 12,5 | 34,8 | 43,4 | 5,2 | 28,1 | 5,5 | 99,2 |
| A5 | 14,5 | 29,0 | 13,5 | 20,6 | 0,0 | 6,5 | 2,5 | 33,3 | 4,2 | 30,7 | 55,9 | 53,5 | 70,0 | 29,2 | 2,4 | 14,1 | 22,2 | 1,4 | 9,7 | 1,5 | 99,2 |
| A6 | 78,5 | 87,1 | 76,3 | 82,3 | 93,5 | 0,0 | 64,9 | 92,8 | 44,0 | 91,9 | 93,9 | 92,7 | 96,0 | 77,0 | 47,7 | 73,1 | 77,9 | 25,1 | 63,1 | 20,2 | 100,0 |
| A7 | 79,8 | 91,7 | 75,7 | 85,8 | 97,5 | 35,1 | 0,0 | 90,7 | 25,7 | 84,3 | 89,4 | 87,4 | 92,3 | 69,3 | 33,7 | 61,5 | 68,8 | 12,9 | 51,7 | 11,2 | 100,0 |
| A8 | 33,4 | 49,3 | 31,2 | 40,5 | 66,7 | 7,3 | 9,3 | 0,0 | 3,9 | 42,9 | 66,5 | 64,4 | 77,0 | 38,6 | 8,8 | 22,0 | 32,5 | 2,1 | 15,5 | 2,5 | 99,5 |
| A9 | 84,2 | 91,1 | 82,9 | 88,0 | 95,9 | 56,0 | 74,3 | 96,1 | 0,0 | 95,3 | 94,0 | 92,5 | 95,3 | 79,5 | 53,6 | 77,9 | 80,5 | 29,3 | 69,8 | 22,7 | 99,9 |
| A10 | 38,4 | 53,3 | 36,4 | 45,9 | 69,3 | 8,2 | 15,7 | 57,1 | 4,7 | 0,0 | 70,8 | 68,4 | 81,5 | 43,3 | 11,5 | 26,2 | 35,6 | 2,6 | 19,9 | 1,9 | 99,6 |
| A11 | 21,5 | 31,1 | 20,6 | 25,6 | 44,1 | 6,1 | 10,6 | 33,5 | 6,0 | 29,2 | 0,0 | 48,1 | 73,8 | 23,5 | 1,4 | 7,6 | 15,7 | 1,0 | 6,0 | 1,9 | 99,6 |
| A12 | 23,8 | 34,4 | 22,8 | 27,9 | 46,5 | 7,3 | 12,6 | 35,6 | 7,5 | 31,6 | 51,9 | 0,0 | 78,1 | 27,3 | 2,6 | 9,3 | 16,3 | 1,4 | 9,1 | 2,7 | 98,7 |
| A13 | 14,7 | 21,3 | 13,7 | 17,5 | 30,0 | 4,0 | 7,7 | 23,0 | 4,7 | 18,5 | 26,2 | 21,9 | 0,0 | 16,6 | 1,2 | 4,0 | 4,8 | 0,8 | 5,1 | 1,4 | 92,4 |
| A14 | 47,1 | 58,0 | 45,5 | 51,8 | 70,8 | 23,0 | 30,7 | 61,4 | 20,6 | 56,7 | 76,5 | 72,7 | 83,4 | 0,0 | 18,5 | 37,3 | 45,8 | 9,6 | 28,1 | 9,5 | 100,0 |
| A15 | 82,7 | 91,8 | 80,0 | 87,5 | 97,7 | 52,3 | 66,3 | 91,2 | 46,5 | 88,5 | 98,6 | 97,4 | 98,8 | 81,5 | 0,0 | 80,8 | 84,6 | 22,8 | 69,5 | 23,3 | 100,0 |
| A16 | 59,0 | 72,7 | 56,4 | 65,2 | 85,9 | 26,9 | 38,5 | 78,0 | 22,1 | 73,8 | 92,4 | 90,7 | 96,0 | 62,7 | 19,2 | 0,0 | 61,6 | 6,0 | 39,1 | 8,4 | 100,0 |
| A17 | 50,5 | 63,7 | 47,5 | 56,6 | 77,8 | 22,1 | 31,2 | 67,5 | 19,5 | 64,4 | 84,3 | 83,7 | 95,2 | 54,2 | 15,4 | 38,4 | 0,0 | 5,9 | 32,6 | 7,0 | 99,8 |
| A18 | 92,9 | 96,6 | 91,6 | 94,8 | 98,6 | 74,9 | 87,1 | 97,9 | 70,7 | 97,4 | 99,0 | 98,6 | 99,2 | 90,4 | 77,2 | 94,0 | 94,1 | 0,0 | 89,2 | 42,9 | 100,0 |
| A19 | 66,7 | 78,6 | 63,5 | 71,9 | 90,3 | 36,9 | 48,4 | 84,5 | 30,3 | 80,1 | 94,0 | 90,9 | 94,9 | 72,0 | 30,5 | 60,9 | 67,4 | 10,8 | 0,0 | 13,0 | 99,9 |
| A20 | 92,6 | 96,3 | 91,8 | 94,5 | 98,6 | 79,8 | 88,8 | 97,5 | 77,3 | 98,1 | 98,2 | 97,3 | 98,7 | 90,5 | 76,8 | 91,6 | 93,1 | 57,1 | 87,0 | 0,0 | 100,0 |
| A21 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,1 | 0,4 | 0,4 | 1,3 | 7,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |

Taulukko A2.2. Parivertailun voittoindeksit (%) vaihtoehdoille SMAA-analyysissä käyttäen asiantuntijoiden antamia painoarvoja. Todennäköisyys, että rivissä oleva vaihtoehto on parempi kuin sarakkeessa oleva.

| | <i>A1</i> | <i>A2</i> | <i>A3</i> | <i>A4</i> | <i>A5</i> | <i>A6</i> | <i>A7</i> | <i>A8</i> | <i>A9</i> | <i>A10</i> | <i>A11</i> | <i>A12</i> | <i>A13</i> | <i>A14</i> | <i>A15</i> | <i>A16</i> | <i>A17</i> | <i>A18</i> | <i>A19</i> | <i>A20</i> | <i>A21</i> |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <i>A1</i> | 0,0 | 78,2 | 35,4 | 54,4 | 95,4 | 51,2 | 26,2 | 89,9 | 36,7 | 91,1 | 99,2 | 98,3 | 99,0 | 87,0 | 36,3 | 83,9 | 78,8 | 13,6 | 65,7 | 18,3 | 100,0 |
| <i>A2</i> | 21,8 | 0,0 | 15,2 | 27,8 | 84,0 | 32,9 | 9,6 | 74,0 | 21,5 | 76,8 | 96,6 | 92,8 | 96,1 | 77,1 | 15,9 | 63,2 | 58,4 | 6,4 | 43,3 | 8,8 | 100,0 |
| <i>A3</i> | 64,6 | 84,8 | 0,0 | 67,0 | 96,1 | 59,8 | 39,6 | 93,2 | 45,7 | 95,0 | 99,4 | 98,9 | 99,5 | 89,0 | 49,4 | 88,9 | 86,4 | 20,3 | 74,6 | 25,1 | 100,0 |
| <i>A4</i> | 45,6 | 72,2 | 33,0 | 0,0 | 92,2 | 48,1 | 24,6 | 86,7 | 33,7 | 88,9 | 98,6 | 97,1 | 98,8 | 84,4 | 34,0 | 79,2 | 75,6 | 12,9 | 62,5 | 16,3 | 100,0 |
| <i>A5</i> | 4,7 | 16,0 | 3,9 | 7,9 | 0,0 | 13,3 | 1,5 | 44,5 | 7,4 | 48,7 | 82,5 | 74,5 | 85,0 | 57,8 | 3,5 | 29,8 | 28,9 | 2,2 | 17,4 | 2,7 | 100,0 |
| <i>A6</i> | 48,8 | 67,1 | 40,2 | 51,9 | 86,7 | 0,0 | 32,5 | 86,0 | 37,1 | 88,7 | 97,5 | 95,8 | 97,4 | 83,5 | 37,9 | 76,5 | 73,9 | 16,8 | 61,8 | 20,0 | 100,0 |
| <i>A7</i> | 73,8 | 90,4 | 60,4 | 75,4 | 98,6 | 67,5 | 0,0 | 97,7 | 53,2 | 98,3 | 99,7 | 99,0 | 99,5 | 93,1 | 57,9 | 94,0 | 90,2 | 24,0 | 83,0 | 28,4 | 100,0 |
| <i>A8</i> | 10,1 | 26,1 | 6,8 | 13,3 | 55,5 | 14,0 | 2,3 | 0,0 | 7,0 | 54,5 | 82,5 | 77,6 | 85,6 | 61,1 | 6,6 | 35,9 | 34,5 | 1,5 | 19,6 | 2,6 | 99,9 |
| <i>A9</i> | 63,3 | 78,5 | 54,3 | 66,3 | 92,6 | 63,0 | 46,8 | 93,0 | 0,0 | 95,3 | 98,3 | 97,0 | 98,1 | 88,0 | 52,6 | 86,7 | 83,6 | 24,3 | 75,8 | 27,9 | 100,0 |
| <i>A10</i> | 8,9 | 23,2 | 5,0 | 11,1 | 51,3 | 11,3 | 1,8 | 45,5 | 4,7 | 0,0 | 80,0 | 75,6 | 85,1 | 57,7 | 6,4 | 31,3 | 30,1 | 1,2 | 18,0 | 1,9 | 99,9 |
| <i>A11</i> | 0,8 | 3,4 | 0,6 | 1,5 | 17,5 | 2,6 | 0,4 | 17,5 | 1,7 | 20,0 | 0,0 | 44,1 | 66,3 | 30,8 | 0,6 | 7,2 | 7,2 | 0,5 | 4,7 | 0,7 | 99,7 |
| <i>A12</i> | 1,7 | 7,2 | 1,1 | 3,0 | 25,5 | 4,2 | 1,0 | 22,4 | 3,0 | 24,4 | 55,9 | 0,0 | 73,1 | 36,3 | 1,6 | 11,7 | 9,1 | 1,0 | 8,1 | 1,4 | 99,3 |
| <i>A13</i> | 1,0 | 3,9 | 0,5 | 1,3 | 15,0 | 2,7 | 0,5 | 14,4 | 1,9 | 14,9 | 33,8 | 26,9 | 0,0 | 26,0 | 1,1 | 6,7 | 4,1 | 0,5 | 5,7 | 0,8 | 94,8 |
| <i>A14</i> | 13,0 | 22,9 | 11,0 | 15,6 | 42,2 | 16,5 | 6,9 | 38,9 | 12,0 | 42,3 | 69,2 | 63,7 | 74,0 | 0,0 | 8,2 | 30,5 | 29,4 | 4,4 | 17,4 | 6,2 | 100,0 |
| <i>A15</i> | 63,7 | 84,1 | 50,6 | 66,1 | 96,5 | 62,1 | 42,1 | 93,4 | 47,4 | 93,6 | 99,4 | 98,4 | 98,9 | 91,8 | 0,0 | 89,7 | 84,3 | 21,7 | 76,1 | 26,2 | 100,0 |
| <i>A16</i> | 16,1 | 36,8 | 11,1 | 20,8 | 70,2 | 23,5 | 6,0 | 64,1 | 13,3 | 68,7 | 92,8 | 88,3 | 93,3 | 69,5 | 10,3 | 0,0 | 46,9 | 2,7 | 32,7 | 5,1 | 100,0 |
| <i>A17</i> | 21,2 | 41,6 | 13,6 | 24,4 | 71,2 | 26,1 | 9,8 | 65,5 | 16,4 | 69,9 | 92,8 | 90,9 | 96,0 | 70,6 | 15,7 | 53,1 | 0,0 | 5,0 | 38,5 | 6,8 | 100,0 |
| <i>A18</i> | 86,4 | 93,7 | 79,7 | 87,1 | 97,8 | 83,3 | 76,0 | 98,5 | 75,7 | 98,9 | 99,5 | 99,0 | 99,5 | 95,6 | 78,3 | 97,3 | 95,0 | 0,0 | 92,0 | 54,9 | 100,0 |
| <i>A19</i> | 34,3 | 56,7 | 25,4 | 37,5 | 82,6 | 38,3 | 17,0 | 80,4 | 24,2 | 82,0 | 95,3 | 91,9 | 94,4 | 82,7 | 24,0 | 67,4 | 61,5 | 8,0 | 0,0 | 12,1 | 99,9 |
| <i>A20</i> | 81,7 | 91,2 | 74,9 | 83,7 | 97,3 | 80,0 | 71,6 | 97,4 | 72,1 | 98,1 | 99,3 | 98,6 | 99,2 | 93,8 | 73,9 | 94,9 | 93,2 | 45,1 | 87,9 | 0,0 | 100,0 |
| <i>A21</i> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,8 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |

Liite 3. Tasoitetussa tuotantokustannuslaskennassa käytetyt lähtöarvot

Taulukko A3.1. Lämmön tasoitettujen tuotantokustannusten laskennassa käytetyt lähtöarvot.

| | A1-A4 Metsä- hake | A5 Metsä- biomassan kaasutin | A6 Bio- kaasu kaa- sukattilassa | A7 Pel- letti | A8 Ja- lostettu pelletti | A9 Bio- diesel | A10 Py- rolyy- siöljy | A12 Aurinko- lämpölaitos | A14 Geo- terminen lämpölai- tos | A15 Maa- lämpö- pumppu | A16 Meri- vesi- lämpö- pumppu | A20 Sähkö- kattila |
|---|-------------------------|------------------------------------|--|------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|------------------------------|--|-----------------------|
| Teho (MW) | 50 ¹ | 40 ¹ | 40 ¹ | 50 ¹ | 50 ¹ | 47 | 47 | 10 000 m ² 5000 MWh/a | 40 | 20 | 20 ⁸ | 20 ¹ |
| Hyötysuhde | 90 % | 75 % | 90 % | 90 % | 95 % | 80 % | 80 % | | 580 % ¹ | 280 % ¹ | 375 % | 99 % ¹ |
| Käyttöikä (a) | 25 (20 ¹) | 25 ¹ | 30–40 ¹ | 25 | 25 | 25 | 25 | 30 ¹ | 25 ¹ | 25 ¹ | 20 ⁸ | 20 ¹ |
| Investointikus- tannus (M€) | 40 ¹ | 20 ¹ | (4 ¹) | 20 ¹ | 20 ¹ | | | 2,3 ¹ | 64 ¹ | 32 ¹ | 19,8 ⁸ | 1,2 ¹ |
| Kiinteät kustan- nukset (M€/a) | | 0,148 ¹ | 0,148 ¹ | | | 0,174 ¹ | 0,174 ¹ | | 1,48 ¹ | 0,68 ¹ | 0,134 ⁸ | 0,022 ¹ |
| Polttoainekustan- nus (€/MWh) | 18,6 ² | 18,6 ² | 50–86 ⁴ (18,6 ² - >55,5 ⁴) | 28 ² | 33–40 ⁵ | 57,5 ⁷ | 38,2 ⁶ | | 50 ³ | 50 ³ | 50 ³ | 50 ³ |
| Muut muuttuvat kustannukset (€/MWh) | 5,4 ¹ | 2,4 ¹ | | 2,7 ¹ | 2,7 ¹ | | | 0,57 ¹ | | | | 0,5 ¹ |

Lähteet: (Badger et al. 2010, Laukkanen, Naumov 2013, Edenhofer et al. 2011, Energi Styrelsen 2012, Aranda et al. 2014, FOEX Indexes Ltd 2015)

¹ (Energi Styrelsen 2012): Aurinkokeräimet 227 €/m² Aurinkolämpölaitos sis. varasto 461 €/MWh/a

² (FOEX Indexes Ltd 2015)

³ (Fingrid 2015) Sähkön Suomen aluehinta oli kulutushuipputunnilla 49,31 €/MWh ≈ 50 €/MWh talven 2014–2015 aikana.

⁴ (Aranda et al. 2014) ⁵ (Laitila et al. 2010) ⁶ (Badger et al. 2010) ⁷ (Neste Oy 2015) ⁸ (Bach et al. 2014)

Liite 4. Tasoitettuja tuotantokustannuksia

Taulukko A4.1. Laskettuja lämmön tasoitettuja tuotantokustannuksia käytetyillä lähtöarvoilla (€/MWh).

| Huipunkäyttöaika (h) | A1-A4 Metsähake | A5 Metsäbiomassan kaasutin ja poltto | A6 Bio-kaasu kaasukattilassa | A7 Pelletti | A8 Jalos-tettu pelletti | A9 Biodiesel | A10 Pyrolyysiöljy | A12 Aurinkolämpö | A14 Geoterminen lämpölaite | A15 Maalämpö | A16 Merivesilämpöpumppu | A20 Sähkökattila |
|----------------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------|-------------------------|--------------|-------------------|------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|------------------|
| 500 | 117,32 | 193,49 | 68,39 | 100,18 | 107,49 | 79,28 | 62,12 | 628,43 | 348,08 | 351,32 | 262,01 | 64,16 |
| 1000 | 71,69 | 116,39 | 64,69 | 66,99 | 74,30 | 75,58 | 60,90 | 314,50 | 178,35 | 184,59 | 137,67 | 57,58 |
| 2000 | 48,88 | 77,84 | 62,84 | 50,40 | 57,71 | 73,73 | 60,29 | 157,53 | 93,49 | 101,22 | 75,50 | 54,29 |
| 3000 | 41,28 | 64,99 | 62,22 | 44,87 | 52,18 | 73,11 | 60,09 | 105,21 | 65,20 | 73,43 | 54,78 | 53,20 |
| 4000 | 37,47 | 58,57 | 61,91 | 42,11 | 49,42 | 72,80 | 59,99 | 79,05 | 51,05 | 59,54 | 44,42 | 52,65 |
| 5000 | 35,19 | 54,71 | 61,73 | 40,45 | 47,76 | 72,62 | 59,93 | 63,36 | 42,57 | 51,20 | 38,20 | 52,32 |
| 6000 | 33,67 | 52,14 | 61,61 | 39,34 | 46,65 | 72,49 | 59,89 | 52,89 | 36,91 | 45,65 | 34,06 | 52,10 |
| 7000 | 32,58 | 50,31 | 61,52 | 38,55 | 45,86 | 72,40 | 59,86 | 45,42 | 32,87 | 41,68 | 31,10 | 51,94 |
| 8000 | 31,77 | 48,93 | 61,45 | 37,96 | 45,27 | 72,34 | 59,84 | 39,81 | 29,84 | 38,70 | 28,88 | 51,83 |
| 8760 | 31,28 | 48,10 | 61,41 | 37,60 | 44,91 | 72,30 | 59,83 | 36,41 | 28,00 | 36,89 | 27,53 | 51,76 |